



Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire.

Laurence Viennot

► To cite this version:

Laurence Viennot. Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire.. Enseignement de la physique [physics.ed-ph]. Université Paris VII, 1977. Français. NNT: . tel-01275119

HAL Id: tel-01275119

<https://theses.hal.science/tel-01275119>

Submitted on 16 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE RAISONNEMENT SPONTANE
EN DYNAMIQUE ELEMENTAIRE

THESE DE DOCTORAT D'ETAT
PRESENTEE A L'UNIVERSITE PARIS VII

par

LAURENCE VIENNOT

pour obtenir le grade de Docteur es Sciences Physiques

Soutenue le 28 Avril 1977

devant la Commission d'Examen :

MM. M. HULIN	Président
G. AUBERT	Examineur
F. BRESSON	"
G. DELACOTE	"
F. HALBWACHS	"
J.L. MALGRANGE	"
J. OGBORN	"

Ce travail a été réalisé au sein d'une équipe. Je remercie vivement J.L. Malgrange, professeur sans chaire, qui a été à l'origine de cette équipe, d'avoir ainsi rendu possible à l'Université Paris VII un type de recherche alors tout nouveau. Son soutien et ses conseils judicieux ne m'ont, depuis lors, jamais fait défaut.

J.L. Malgrange, E. Saltiel et moi-même avons défini en commun l'esprit général de cette recherche, et élaboré peu à peu des méthodes de travail appropriées. Sans cette collaboration, qui n'a jamais eu que des aspects positifs, ce travail n'aurait pas pu être mené à bien.

F. Bresson, directeur d'études à l'Ecole Pratique des Hautes Etudes, a fait beaucoup par ses encouragements et ses critiques toujours très intéressantes, pour assurer nos débuts et nous inciter à poursuivre. Qu'il trouve ici l'expression de toute notre gratitude. Je remercie également F. Halbwachs, professeur à l'Université de Provence : l'intérêt qu'il nous a toujours manifesté, et sa grande culture, notamment en histoire des sciences, m'ont été une aide appréciable.

Chez les physiciens, c'est au professeur M. Hulin que nous devons la reconnaissance la plus ancienne et la plus vive : il fut parmi les premiers à s'intéresser à notre tentative, et à créer les conditions d'un débat sur les thèmes que nous abordions. Le professeur G. Aubert, par sa grande ouverture d'esprit, a contribué considérablement à ce débat : les publications dont il s'est chargé ont été à l'origine de nombreux contacts tout à fait stimulants, et je l'en remercie chaleureusement.

Je remercie également G. Delacôte et O. Betbeder-Matibet, professeurs à l'Université Paris VII, qui ont critiqué le manuscrit de cette thèse avec une grande rigueur et m'ont fait bénéficier de leurs conseils, et plus généralement tous les physiciens de notre entourage qui ont eu, à l'égard de notre recherche, une attitude ouverte et critique.

Je dois une reconnaissance toute spéciale à ceux qui ont accepté d'associer leurs étudiants à ces expériences : enseignants de l'Université Paris VII, trop nombreux pour être cités ici, de l'enseignement secondaire : Melle Guilleman, Mme Moreau, de classes préparatoires : M. Tantart, M. Fauconnet. Le professeur L.R.B. Elton a bien voulu organiser en Grande-Bretagne une expérience complémentaire : je l'en remercie vivement.

Je tiens à remercier également J. Ogborn, de Chelsea College, qui a accepté de faire partie du jury de cette thèse, et m'a fait ainsi bénéficier de ses critiques et de sa très grande expérience des problèmes de l'enseignement.

Je remercie enfin S. Girard, qui a assuré la frappe du texte, pour son extrême compétence et gentillesse.

TABLE DES MATIERES

	Pages
<u>INTRODUCTION</u>	
I. OBJECTIF GENERAL	1
II. METHODE ET DOMAINE D'INVESTIGATION	
1. L'objection du piège	5
2. Faits expérimentaux et problèmes d'analyses	7
3. Interprétation en termes de modes de raisonnement	9
4. Champ d'investigation	10
III. PLAN D'ETUDE	11
 <u>PREMIERE PARTIE : ESQUISSE D'UN MODELE DES RELATIONS ENTRE LES ASPECTS DYNAMIQUES ET CINEMATIQUES DU MOUVEMENT DANS LES RAI- SONNEMENTS SPONTANES DES ETUDIANTS</u>	14
I. LES EXPERIENCES ET LEURS RESULTATS	
1. Les questionnaires	
2. Présentation de l'enquête aux étudiants	15
3. Populations interrogées	16
4. Texte des questions posées et résultats	
4.1. Question 1 - problème posé	17
4.1.1. Question 1a	18
4.1.2. Question 1b	20
4.2. Question 2 - problème posé	
4.2.1. Question 2a	22
4.2.2. Question 2b	25
4.2.3. Question 2c	31
4.3. Question 3	34
II. DISCUSSION DES RESULTATS	
1. Force et Vitesse	35
2. Délocalisation spatiotemporelle de la Force	39
3. Intervention spécifique de la relation $F = \alpha(V)$	
La question 3	40

4. "Force" : deux notions différentes	41
5. Force et énergie	46
III. QUELQUES HYPOTHESES SUR LES FORCES D'INERTIES ASSOCIEES AUX SITUATIONS D'ENTRAINEMENT	48
1. Forces d'inertie et Capital de Force	49
2. Mouvement rectiligne	50
3. Mouvement circulaire uniforme	52
IV. RECAPITULATION	
1. Raisonnement local ou non local	55
2. Raisonnement spontané et formalisme mathématique	56
 <u>DEUXIEME PARTIE : EXPERIENCES COMPLEMENTAIRES</u>	
. Introduction	61
. Le pendule simple (questionnaire P)	
I. Description de l'expérience	62
II. Résultats du questionnaire P	64
III. Discussion	
1. Mouvement et type de réponse : quelques points remarquables	66
2. Incompatibilité force-mouvement et "capital de force" tangentiel	
3. Caractéristiques du Capital de Force	68
4. La force centrifuge	69
IV. Résumé	71
. Le questionnaire du glaçon (questionnaire G)	
I. Description de l'expérience	72
II. Résultats du questionnaire G	74
III. Discussion des résultats	78
IV. Résumé	80
Conclusion	81
 <u>TROISIEME PARTIE : RAISONNEMENT SPONTANE EN SITUATION SCOLAIRE USUELLE</u>	
. Introduction	83
. Concours de P.C.E.M. 1974	
I. Texte	86

II. Résultats et discussion :	
1. Remarques préliminaires	
2. Quelques résultats d'ensemble	87
3. Force et Energie	
3.1. Confusions Force-Energie	88
3.2. Affectation de la Force et de l'Energie	90
4. Structure des bilans de force-énergie en Partie I.	
Action et Réaction	
4.1. Compression du ressort, état et transformation	92
4.2. Détente du ressort : position et mouvement de la masse	95
5. Approches locales et non locales en partie II	
5.1. Forme spécifique des réponses en questions IIa et IIb	98
5.2. Force et Energie. Fonctions de point ou de mouvement ?	103
III. Remarques sur l'analyse des réponses	
1. Interprétation globale et diagnostic individuel	106
2. Obstacles intuitifs et difficultés formelles	108
Conclusion	109
Annexe 1 : Solution de l'exercice de P.C.E.M.	111
Annexe 2 : Résultats en questions Id, IIa, IIb	112
Annexe 3 : Quelques remarques sur l'analyse des réponses	120
. Quelques résultats complémentaires : un exercice de Travaux Dirigés	
Introduction	
I. Texte et solution de l'exercice	122
II. Résultats et discussion	
1. Question sur l'équilibre	123
2. Question sur le décollage de la masse du bas	
2.1. Résultats	126
2.2. Discussion	127
2.2.1. Les bilans de forces	
2.2.2. Quelle "force vers le haut" ?	128
2.2.3. Capital de force, énergie et localisa- tion	130
Conclusion	131

QUATRIEME PARTIE : CONNAISSANCE DES MODES DE RAISONNEMENT
SPONTANES ET ENSEIGNEMENT

Introduction

I. Quelques éléments d'un bilan de l'enseignement reçu	133
II. Quelques suggestions pour l'enseignement	136
III. Réactions des étudiants aux questionnaires précédents	138
Conclusion	141
Annexe : Documents de travail	142

CINQUIEME PARTIE : LES RAISONNEMENTS SPONTANES DANS LEUR
CONTEXTE HISTORIQUE GENETIQUE ET CULTUREL

. Quelques faits d'histoire des sciences

Introduction

I. Cause du mouvement, force et impetus	
1. Cause externe - cause interne	151
2. Terminologie	152
3. Propriétés de l'impetus	
3.1. Impetus attribué à l'objet	154
3.2. Introduction de l'impetus dans le mobile	155
3.3. Evolution de l'impetus au cours du mouvement	156
3.4. Relation entre Impetus et Vitesse, entre Force et Vitesse	158
3.5. Impetus. Grandeur mi-scalaire, mi-vectorielle	
4. Impetus et relativité	161
II. Le mouvement pour lui-même	163
III. La force centrifuge	168

Conclusion	175
------------	-----

. Développement cognitif et explications spontanées en dynamique
élémentaire

I. Le développement des notions dynamiques chez l'enfant, selon Piaget	177
II. Quelques éléments de l'évolution des notions dynamiques élémentaires	
1. Force, cause liée à un effet	179
2. Cause assimilée à l'objet, attribuée à l'objet	183
3. Le mouvement retrouvé	184

4. Prévisions de mouvements	186
4.1. Descente et remontée d'une bille sur une piste de pente et longueur variables	
4.2. Mouvements inertiels	187
4.3. Caractères généraux de l'évolution des notions dynamiques chez les enfants	188
III. Les explications dynamiques des enfants	
1. Les constantes	191
2. Constitution et stabilisation du système explicatif en dynamique	197
• <u>Raisonnement spontané dans l'environnement culturel actuel</u>	
Question d'un interrogatoire Piagétien	200
Incidence de la vitesse sur les accidents de la route	201
L'absence de pesanteur	203
Inertie et position du cavalier à cheval	205
Pourquoi la terre se maintient-elle sur son orbite ?	208
Le modèle de Bohr	209
Le virage aval	210
Adhérence lors d'un virage	211
Action et Réaction	213
Force active et Force passive	214
CONCLUSION GENERALE	216

INTRODUCTION

I. OBJECTIF GENERAL

C'est d'abord la constatation d'un échec qui est à l'origine de ce travail : de longues années d'enseignement conduisent l'étudiant en fin de Maîtrise de Physique, pourvu de connaissances relativement complexes, mais laissent subsister des erreurs qui seraient déjà étonnantes en Terminale. Quel enseignant n'a pas fait de ces pénibles découvertes, d'autant plus suprenantes que, sur certains terrains, les auteurs de telles erreurs n'étaient pas si mauvais ? Cette situation est très répandue si bien qu'il est difficile d'en attribuer la responsabilité à tel ou tel enseignant, que l'on déclarerait incompétent pour se débarrasser du problème. Il faut donc tenter une analyse plus poussée, qui prenne d'abord comme objet le premier acteur dans cette affaire : l'élève, ou l'étudiant, lui-même, laissant pour un deuxième temps toute préoccupation plus spécifiquement pédagogique, concernant les divers aspects de l'enseignement : structure de la matière enseignée, stratégie pédagogique, place de l'enseignant dans le processus d'apprentissage...

Le cadre général de cette étude est donc une investigation des modes de raisonnement des étudiants en physique. Ce terme de "raisonnement" désigne ici, de façon très générale, la procédure par laquelle, à partir d'une question portant sur une réalité physique donnée, la personne interrogée élabore une réponse. Il recouvre donc un fait extrêmement complexe qu'il n'est pas question, ici, d'épuiser ni même d'aborder dans ses multiples aspects.

Nous nous limiterons, dans cette recherche, au domaine de la mécanique élémentaire, et plus particulièrement aux relations entre Force, Energie et Mouvement. A partir de l'analyse des réponses, nous nous efforcerons de rechercher des concepts, des relations entre concepts, ainsi que les conditions qui suscitent leur intervention. Certes nous n'aurons pas directement accès à la connaissance de ces concepts ou de ces relations, mais nous essaierons de les établir à partir des réponses des étudiants. Pour nous, cette interprétation reviendra donc à dire : tout se passe comme si les auteurs de ces réponses faisaient appel à ces concepts. Cette expression : "tout se passe comme si" devra être mise en préalable commun devant tout ce qui est dit dans cette étude sur les raisonnements des étudiants ou de qui que ce soit. Rien ne permet, en effet, d'affirmer que l'on atteint de près ou de loin les procédures mentales effectivement mises en oeuvre. Il s'agira donc, dans un premier temps, d'organiser les résultats obtenus plutôt que d'expliquer leur genèse. Cette organisation reviendra à associer à tel ou tel type de situation physique, et de question sur cette situation, un comportement observable chez les étudiants. Faut-il ajouter qu'une telle association n'est que probable, et qu'il ne saurait être question de décrire autre chose que des tendances d'ensemble ?

Ceci dit, l'intérêt d'une telle entreprise n'apparaît pas nécessairement comme évident. En effet, les raisonnements mis en oeuvre par les étudiants pour interpréter la réalité pourraient, a priori, se réduire à ceux de la physique que l'on enseigne. Dans la même perspective, les difficultés qu'ils rencontrent tiendraient uniquement à la structure de la physique enseignée, laquelle fournirait alors le seul et unique cadre de référence pour analyser ces difficultés.

Mais aussitôt une question se pose. La matière enseignée, en effet, ne se réduit pas à la donnée de quelques formules, $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ par exemple, qui en elles-mêmes n'auraient strictement aucun sens. Ce qui est enseigné se définit par l'ensemble d'une théorie et des situations expérimentales dont elle rend compte, ainsi que l'a souligné T.S. Kuhn (1962). En ce sens, le choix des situations présentées en cours d'enseignement est un élément essentiel pour définir le contenu de la matière enseignée.

Qu'en est-il pour les étudiants ? Leurs difficultés se situent-elles au niveau d'une manipulation purement formelle de la théorie, ou bien plutôt dans l'analyse de telle ou telle situation physique en termes formalisés* ? Il semble que, au moins en physique élémentaire, l'obstacle du calcul formel soit loin d'être le plus fondamental, et que le problème essentiel soit celui de l'analyse du réel en termes formalisés. Cette difficulté est masquée car, bien souvent, on ne demande pas à l'étudiant de procéder à cette analyse : celui-ci n'a guère qu'à transformer mathématiquement des données toutes prêtes pour ce traitement. Mais elle apparaît manifestement à propos de questions sur des situations proprement physiques, dont la réponse exige très peu de calcul, et qui engendre des hésitations sans rapport avec les compétences mathématiques des élèves.

Nous nous proposons de montrer que, au moins dans ce domaine limité de la mécanique élémentaire, ces difficultés dans l'analyse formelle correcte de la réalité physique sont liées en partie à l'existence de modes de raisonnement propres, pour la plupart spontanés et intuitifs. Ceux-ci peuvent constituer une "physique" implicite, que l'étudiant utilise parallèlement à celle qu'on lui enseigne. Il faut entendre ici les termes de "spontané" et "intuitif" dans un sens très relatif. Nous voudrions signifier par là qu'il s'agit de raisonnements existant indépendamment des acquisitions scolaires, et présentant certains caractères propres à ce qu'on entend couramment par "spontanéité" et "intuition" : ils conduisent à une réponse rapide, non réfléchie, considérée comme évidente et dont les justifications sont relativement peu explicitées. Nous ne sommes guère en mesure, ici, de situer plus précisément le degré de "spontanéité" des réponses, ni la place des acquis de tous ordres dans l' "intuition". C'est lorsqu'ils conduisent

* Ce terme ne doit pas laisser croire que le statut du formalisme obtenu s'identifie à celui d'une théorie mathématique. En particulier, les objets définis en physique sont parfois désignés par des symboles identiques à ceux que l'on utilise en mathématiques, sans pour autant posséder toutes les propriétés des objets mathématiques correspondants.

à une erreur que ces raisonnements intuitifs se font d'abord remarquer, et l'on peut alors mesurer leur prodigieuse résistance, tout au long des cursus scolaires et universitaires. Les conclusions qu'ils justifient sont maintenues malgré les démentis de la physique enseignée, ou plutôt subsistent à côté de celle-ci sans qu'il y ait réelle confrontation. L'usage des mêmes termes dans la physique telle qu'on l'enseigne et dans les réponses intuitives n'est nullement le signe, ou la garantie, qu'il s'agisse des mêmes notions dans l'un et l'autre registre, ni même que l'étudiant se soucie de leur compatibilité.

Dans d'autres cas, le raisonnement intuitif peut aboutir à un résultat juste, à une question pertinente, sans qu'intervienne apparemment la théorie enseignée, ou bien utiliser spontanément des concepts, des procédures, identiques à ceux de la théorie correcte. Ceci recouvre en partie ce qu'on nomme couramment le "sens physique".

Si l'on prétend maîtriser quelque peu les conséquences, bénéfiques ou non, de ces phénomènes, il importe de situer aussi précisément que possible les concepts, leurs relations et leurs règles d'utilisation, qui sont mis en oeuvre dans la démarche spontanée, y compris quand il y a non pas contradiction mais coïncidence avec ceux de la physique enseignée.

Nous venons de souligner l'absence d'interaction, parfois spectaculaire, entre deux modes de raisonnement, l'un intuitif, l'autre appris. Ce cas extrême n'épuise évidemment pas la question, fort complexe, de la part de l'enseignement dans la progression du raisonnement en physique. La physique telle qu'on l'enseigne, fort heureusement, peut devenir un outil d'analyse utilisable malgré les impératifs de l'intuition. Mais nous n'étudierons pas, en tant que tels, les processus par lesquels l'enseignement peut mobiliser le raisonnement spontané tout en n'en laissant subsister que les éléments compatibles avec la théorie enseignée, ni les conditions de plus ou moins grande efficacité de ces processus. L'objet de cette étude est la mise en évidence de tendances générales du raisonnement spontané, sur un éventail aussi large que possible de populations et de circonstances, sans que l'on cherche, dans un premier temps, à faire apparaître et à interpréter en détail le fait que ces

tendances aient été plus ou moins efficacement exploitées et/ou canalisées par l'enseignement. Pour apporter, sur ce dernier point, des éléments d'informations réellement fiables, et non seulement des conjectures, il faudrait mener d'autres recherches.

II. METHODE ET DOMAINE D'INVESTIGATION

L'entreprise que nous venons de définir ne va pas sans poser de nombreux problèmes de méthode. Certains portent sur le principe même des expériences réalisées, d'autres, que nous aborderons ensuite, prennent un aspect plus technique.

1. L'objection du piège

Pour avoir quelque chance de faire apparaître nettement un phénomène, il ne suffit généralement pas d'analyser la réalité telle qu'elle se présente, c'est-à-dire ici les réponses à des questions habituelles rencontrées dans l'enseignement. Ceci est suffisamment confirmé par l'histoire de la connaissance comme par la pratique effective de n'importe quelle recherche pour que l'on n'insiste guère. Peut-être, pourtant, faut-il bien redire que le type de recherche entrepris ici n'échappe pas à cette règle commune, quelle que soit l'abondance d'informations dont on peut disposer du seul fait, par exemple, que l'on enseigne.

Il importe donc de construire des expériences avec une intention précise, en ce sens qu'on en prévoit plus ou moins le résultat, ou du moins que l'on dispose d'un code de lecture précis pour en tirer les conclusions. Dans le cas présent, les expériences consistent à poser des questions aux étudiants et à en enregistrer les réponses. Cette procédure ne s'est révélée réellement instructive qu'à partir du moment où, en cours d'enseignement ou d'enquête préliminaire, nous avons pu nous faire une idée relativement nette de tel ou tel mode de raisonnement, et construire ensuite une question propre à faire apparaître celui-ci à l'état aussi pur que possible.

Mais alors vient l'objection : "il n'y a rien d'étonnant à ce que les élèves se trompent, tout est fait pour cela, c'est un piège".

C'en est un, en effet, si l'on entend par là que l'on étudie la réaction d'un étudiant à une sollicitation bien précise dont on soupçonne les effets. Ceci conduit à revenir sur l'objet de cette étude : le phénomène étudié ne saurait être une réalité en soi, indépendante de l'instrument de mesure. C'est en ce sens que nous préférons ici l'expression : "mode de raisonnement spontané" au terme plus élégant et plus habituel de "représentation". Il y a dans ce mot un aspect statique qui risque de prêter à confusion et de laisser oublier que tout raisonnement part d'une sollicitation, fut-elle un choc brutal contre un lampadaire, une question d'examen ou un "piège" élaboré par un enquêteur. La forme des questions posées, le type de situation proposée, se révéleront en effet des facteurs essentiels dans la manière dont les étudiants mobilisent tel ou tel mode de raisonnement.

Il reste que la situation où se trouvent les étudiants lors d'une enquête, et surtout la forme des questions qui leur sont présentées, sont très différentes de celles qu'ils rencontrent dans un contexte scolaire habituel. On notera, en particulier, que certains énoncés seraient très contestables en tant qu'outils de contrôle et même, par certains côtés, en tant qu'outils d'enseignement : artificiels, parce que rien dans la vie courante ne suggère la même question, de lecture difficile, irréalistes parfois, ou susceptibles de faire surgir des problèmes délicats pour qui pousserait plus avant sa réflexion. Il n'y aurait là, pour cette analyse, un véritable obstacle que dans la mesure où l'interprétation des réponses s'en trouverait entravée. Nous nous efforcerons de montrer que tel n'est pas le cas : les phénomènes observés ne peuvent pas s'expliquer seulement par ces aspects particuliers des textes proposés, puisque ceux-ci varient d'un questionnaire à l'autre sans pour autant affecter la cohérence d'ensemble des résultats et de leur interprétation. C'est donc délibérément que nous acceptons ce terme de "piège" pour désigner l'outil de recherche utilisé ici. Encore faut-il souligner que le piège est loyal, bien que le rapprochement de ces deux termes soit pour le moins inhabituel : les éléments qui

sont, du point de vue du physicien, nécessaires et suffisants pour répondre sont toujours explicités clairement dans le texte et parfois même soulignés. Ce terme ne doit pas non plus laisser croire que le but est de provoquer beaucoup de mauvaises réponses. Ce que l'on cherche, ce sont des réponses instructives du point de vue de cette enquête : la procédure consiste donc à chercher les questions les plus à même de mettre en évidence les aspects intuitifs du raisonnement.

Une question se pose alors : les tendances du raisonnement spontané, que l'on peut mettre en évidence par des expériences très spécifiques et très focalisées, se manifestent-elles aussi en situation scolaire usuelle ? Si la réponse était négative, l'intérêt des résultats obtenus semblerait bien limité, au moins du point de vue de l'enseignement. Nous reviendrons, dans la suite de cette étude, sur ce point essentiel, qui est l'occasion de difficultés méthodologiques particulièrement importantes.

2. Faits expérimentaux et problèmes d'analyse

Les éléments d'information sur lesquels s'appuie cette étude sont les suivants :

a) On dispose d'abord de réponses à des questions très fermées (OUI, NON, ?) ou bien plus ouvertes (dessins, par exemple) mais pour lesquelles un classement simple reste possible. Les pourcentages correspondants ne constituent évidemment que des indications d'ordre de grandeur. Dans quelle mesure pourra-t-on estimer qu'ils reflètent une tendance du raisonnement spontané, et non simplement le "hasard", dû en fait à une multitude de facteurs non contrôlés, ou bien, à l'autre extrême, les effets directs de l'enseignement reçu. Nous ne pourrions guère, pour en juger, qu'envisager successivement ces deux hypothèses puis, éventuellement, les éliminer.

Lorsque ce qui a été enseigné ne favorise a priori aucune des catégories de réponses examinées, nous considérerons comme significatif tout écart important entre un taux de réponses observé et celui qui résulterait d'une égale probabilité de toutes les réponses.

Mais, le plus souvent, l'une des réponses possibles correspond à ce que les élèves "devraient savoir depuis longtemps", tant le "niveau" de ce qu'on leur enseigne dépasse celui de la question. Nous comparerons alors le pourcentage obtenu pour cette réponse à celui que l'on pourrait attendre "normalement", 80 % par exemple. Parallèlement, un taux d'erreur de 20 % à 30 % sera alors considéré comme le signe d'un phénomène important. Dans la même perspective, l'unanimité pour une réponse correcte apparaîtra aussi comme un fait remarquable témoignant, au moins, de l'absence d'obstacles intuitifs. Les expressions signalées par des guillemets dans le passage qui précède soulèvent chacune bien des questions. Elles se réfèrent à l'usage habituel qu'en font les enseignants, lequel est, bien sûr, conditionné par des hypothèses implicites de tous ordres. Ceci dit, si l'on veut tenir compte de cette "polarisation a priori" des réponses par l'enseignement, sans se laisser paralyser par l'absence de critère absolu, il faut accepter de faire une large place à l'estimation personnelle, ce qui n'est guère satisfaisant. Sur chaque cas, le lecteur en jugera. Mais il faut, pour justifier réellement les interprétations que l'on propose, en situer les arguments dans un cadre plus large, ce que l'on fera plus loin.

b) Il reste les textes libres fournis par les étudiants en justification des réponses envisagées ci-dessus, ou bien lors d'entretiens oraux. L'ensemble des formulations possibles comprenant un nombre considérable d'éléments, la probabilité de chacun devient quasiment nulle. Dans ce contexte, une analyse par mot-clé ou groupe de mots-clé laisse passer à travers ses mailles toute la signification de certaines réponses. Les mêmes termes en effet peuvent y prendre des sens extrêmement différents, sans qu'aucun élément actuellement susceptible de repérage ou de classification systématique puisse intervenir pour les distinguer. A ce premier niveau de l'interprétation, l'expérimentateur est renvoyé à son jugement, donc en fait à une foule d'hypothèses implicites. On ne peut pas trouver, pour ce travail, d'autre méthode plus efficace et plus sûre. Seules les dernières expériences, portant sur des contrôles scolaires, canalisent les réponses des étudiants dans un cadre semi-formel et permettent une analyse plus systématique de la structure des formulations recueillies.

3. Interprétation en termes de "modes de raisonnement"

Si l'on admet maintenant que les taux de réponses et les commentaires obtenus traduisent de façon significative une tendance d'ensemble chez les étudiants, on n'aura pas pour autant établi l'existence d'un mode de raisonnement, mais tout au plus une association question-réponse.

On ne peut aller plus avant dans l'interprétation qu'au prix d'hypothèses sur les concepts et les règles adoptés par l'étudiant dans le raisonnement qui le conduit de la question à la réponse. Toute la difficulté de l'entreprise est là. Aucune des expériences présentées ici ne pourra convaincre, à elle seule, du bien fondé de l'interprétation proposée. Chacune de ces expériences, en effet, peut donner lieu à de nombreuses conjectures entre lesquelles le résultat ne saurait trancher. Il serait arbitraire d'avancer, pour chaque expérience, une explication "ad hoc" : ici les élèves ne comprennent pas l'énoncé, là le texte est irréaliste, telle erreur est induite par l'enseignement, etc...

En quoi notre interprétation est-elle plus sûre ?

Les hypothèses que nous avancerons ne se justifient que dans la mesure où elles constituent un modèle "compact" du raisonnement spontané dans le domaine exploré ici.

Nous entendons par là qu'il faut relativement peu d'hypothèses pour rendre compte d'expériences qui se différencient tant par la question proposée que par le système physique particulier qui l'illustre, sans parler des diverses variétés d'énoncés évoquées plus haut.

Il ne faut pas voir, dans l'application de ce "principe d'économie", l'effet d'une simplification abusive. La multiplicité des facteurs étrangers au modèle demeure, et leur influence ne doit pas être passée sous silence. Ambiguïtés linguistiques, difficultés formelles, approximations nécessaires pour réduire une situation concrète à une situation physique schématisée, autant d'obstacles qui laissent leurs traces dans les réponses enregistrées. Celles-ci peuvent dépendre aussi du type de formation des sujets, de facteurs psychologiques, sociologiques ou autres.

Il s'agit plutôt d'une tentative pour trouver, dans un domaine si difficilement maîtrisable, un moyen de garantir l'interprétation que l'on propose tout en dégagant des phénomènes généraux. Ce n'est qu'ultérieurement, une fois ceux-ci relativement bien établis, que l'on pourrait tenter d'évaluer l'effet spécifique d'autres facteurs que l'on vient d'évoquer.

4. Champ d'investigation

Le travail exposé ici concerne les relations entre Force, Energie et Mouvement. Ce champ d'investigation est indiqué à plusieurs titres :

- Les relations entre Force, Energie et Mouvement sont à la base de la physique, et la manière dont les étudiants les comprennent est sans doute décisive pour une bonne part de leurs études ultérieures.

- Ces relations font, dans le formalisme newtonien, l'objet d'un modèle qui est relativement simple, tant qu'on s'en tient à quelques cas limités : il existe une relation de proportionnalité, $\vec{F} = m \vec{\gamma}$ entre le vecteur "Force exercée sur une masse ponctuelle", en un point et à un instant donnés, et une caractéristique du mouvement en ce point et à cet instant, le vecteur Accélération. On envisage dans ce travail uniquement des champs de forces indépendants du temps, où les interactions ne dépendent que des positions des mobiles.

- Enfin, les concepts de la mécanique sont constamment évoqués dans la vie courante, et ceci depuis l'âge le plus tendre : force musculaire, énergie physique, poids, vitesse, force centrifuge, élan, allègement, force du vent, du courant, la liste serait longue de ces expressions que l'on rencontre au hasard d'un large éventail de circonstances. L'essor des transports motorisés d'une part, ce qu'il est convenu d'appeler "le haut degré de technicité" de certains sports d'autre part, favorisent particulièrement l'usage d'explications mécaniques plus ou moins compatibles avec les concepts enseignés. Il serait bien surprenant que cette pratique généralisée et quotidienne soit sans relations avec la façon dont les étudiants comprennent les notions fondamentales de la dynamique.

Nous éliminerons de notre champ d'investigation tous les mouvements que le langage courant, et souvent celui du physicien, qualifient d'apparents : les forces alors n'interviennent généralement pas dans le raisonnement spontané, pour rendre compte du mouvement. Par exemple, lorsqu'un arbre passe à toute allure devant la fenêtre d'un train en marche, aucun voyageur ne cherche quelle force l'a poussé.

Nous étudierons uniquement les situations physiques susceptibles de faire intervenir une relation causale entre Force et Mouvement.

Cette classe de phénomènes se définit mal à l'aide des seuls concepts du physicien. On peut dire, très grossièrement, qu'elle inclut les cas où il existe, ou bien il a pu exister, une interaction entre l'objet en mouvement et un autre, lié au référentiel de l'observateur. Mais elle comprend aussi d'autres cas où la relation causale provient d'un "lien physique" entre objets qui n'est pas une interaction au sens strict : il pourra s'agir d'un simple contact même sans frottement, ou encore du fait que l'un des objets est géométriquement inclus dans l'autre. Les conditions d' "apparence" ou de "réalité" d'un mouvement ont été analysées plus finement lors d'une autre série d'expériences (J.L. Malgrange, E. Saltiel, L. Viennot (1975) ; L. Maury, E. Saltiel, L. Viennot (1977), E. Saltiel (1977)). Nous nous en tiendrons ici à la formulation globale que nous venons d'en donner.

III. PLAN D'ETUDE

La première partie de cette étude comporte les expériences de base, les plus focalisées dans leur objet, les plus simples à interpréter. Ces expériences, auxquelles s'ajoutent des observations et des hypothèses personnelles, suggèrent un modèle du raisonnement spontané des étudiants, que nous exposerons.

Dans une seconde partie, nous confronterons les prédictions de ce modèle aux résultats obtenus lors d'expériences plus complexes, tant par la situation proposée que par la diversité des hypothèses que l'on pourrait faire pour interpréter les réponses. A elles seules, ces expé-

riences ne sauraient être constitutives d'un modèle, mais elles confirment, a posteriori, le caractère prédictif de celui que nous proposons. Il s'agit néanmoins, comme en première partie, d'expériences construites dans un but bien précis : l'enquêteur attire l'étudiant sur un terrain qu'il a choisi lui-même. La généralité des conclusions que l'on en tire reste encore, à cette étape, contestable.

La troisième partie a pour but d'apporter des éléments de réponse sur ce point. Nous nous efforcerons de montrer que les tendances du raisonnement spontané, dont nous avons fait le diagnostic par des expériences très spécifiques, se manifestent lorsque l'étudiant se trouve, cette fois, en situation scolaire usuelle et que l'on a accès à ses réponses à travers une copie de concours ou lors d'un exercice de travaux dirigés.

La quatrième partie contient quelques remarques, quelques pistes de recherche, que cette étude suggère pour l'enseignement. Il ne faudrait pas mesurer l'intérêt de cet aspect de la question par la place, limitée, que celui-ci occupe dans ce travail. Mais il ne conviendrait guère de s'étendre sur un domaine où l'on avance plus d'hypothèses personnelles que de résultats d'expériences proprement pédagogiques. Là est la seule raison de ce laconisme.

Enfin, en cinquième partie, nous montrerons que la généralité des raisonnements spontanés étudiés ici s'étend bien au-delà du contexte scolaire ou universitaire. Nous établirons d'abord des rapprochements entre les tendances du raisonnement mises en évidence chez les étudiants et les difficultés rencontrées par nos ancêtres dans leur défrichage d'un terrain aujourd'hui conquis. L'idée n'est pas nouvelle et nombreux sont les auteurs qui l'ont développée, retrouvant des éléments communs dans les évolutions génétique et historique de la connaissance en divers domaines. Cependant l'hypothèse d'un parallélisme complet entre ces deux évolutions serait quelque peu simpliste et a déjà été dénoncée. Sans conclure sur l'équilibre qu'il convient d'établir entre ces deux points de vue, nous nous bornerons à relever quelques coïncidences particulièrement frappantes essentiellement à partir de l'oeuvre de A. Koyré (1966-1968). C'est ensuite chez les enfants que nous chercherons des

éléments de comparaison. J. Piaget et ses collaborateurs étudient depuis longtemps les comportements enfantins devant des situations physiques variées. Leurs travaux constituent une mine particulièrement riche de faits expérimentaux dont certains rejoignent directement ceux qui concernent les adultes. Nous terminerons par l'examen de quelques textes contemporains glanés ça et là dans les contextes les plus variés : article de journal, fascicule "Que Sais-je ?", ou autres... Nous voudrions par là indiquer à quel point les tendances spontanées qui font l'objet de cette étude sont, en fait, diffuses dans tout l'environnement culturel actuel, lequel reflète, pour une bonne part, la manière dont tout le monde raisonne.

PREMIERE PARTIE

ESQUISSE D'UN MODELE DES RELATIONS ENTRE
LES ASPECTS DYNAMIQUES ET CINEMATQUES DU MOUVEMENT
DANS LES RAISONNEMENTS SPONTANES DES ETUDIANTS

I. LES EXPERIENCES ET LEURS RESULTATS

1. Les questionnaires

Une période de reconnaissance préalable, faite d'expériences préliminaires et de pratique enseignante, a permis d'élaborer une série de questionnaires papier-crayon portant sur des points précis et prévus pour une durée de 20 à 30 minutes.

Ce mode d'expérimentation présente de nombreux avantages. Simple et peu coûteux, il permet d'obtenir un nombre raisonnable de données en un délai relativement bref. Le dialogue individuel est essentiel pour guider la recherche, mais le questionnaire papier-crayon fournit plus facilement l'assise expérimentale indispensable.

C'est, de plus, un outil de recherche facilement transmissible. Ceci est important car il n'est pas de meilleur moyen pour convaincre que de fournir les instruments mêmes de sa propre conviction, comme on a déjà pu le vérifier auprès des collègues qui ont bien voulu associer leurs réflexions et leurs élèves à ce travail. On a également pratiqué des entretiens individuels sur les mêmes thèmes, auprès d'étudiants littéraires, pour éviter que ceux-ci ne renoncent à s'exprimer au nom d'une prétendue incompetence.

2. Présentation de l'enquête aux étudiants

Les étudiants répondent aux questionnaires par groupe de 25 environ. L'enquêteur leur présente d'abord, aussi clairement que possible, le but de l'enquête et leur demande une collaboration décontractée. Les réponses sont anonymes, pour éviter toute attitude propre aux situations de contrôle. Les étudiants sont invités à expliciter autant qu'ils le peuvent leur pensée, leurs incertitudes, ce qu'ils ne comprennent pas ou ce qui leur manque dans le texte. On leur dit de ne pas s'inquiéter de la trop grande facilité d'un exercice, et de ne pas craindre d'y répondre par des évidences. On leur demande de laisser apparentes leurs corrections

successives, en les numérotant, et de ne jamais écrire que leur point de vue, même s'ils discutent avec acharnement avec leur voisin. Souvent surpris de prime abord, par cette règle du jeu inhabituelle, les étudiants s'y prêtent dans l'ensemble très bien. Très mobilisés, ils maintiennent dans la plupart des cas leur point de vue initial malgré de longues discussions et ne rendent souvent leur copie qu'à regret.

3. Populations interrogées

On s'est efforcé de diversifier les groupes d'étudiants interrogés

D'abord centrées sur les étudiants de première année scientifique à l'Université, ces expériences concernent également, selon les cas :

- des élèves de Terminale D
- des élèves de classes préparatoires aux grandes écoles (Mathématiques Supérieures et Mathématiques Spéciales)
- des étudiants de seconde année de 1er cycle (DEUG) et de première année de maîtrise
- des étudiants en Formation Permanente
- des étudiants littéraires (DEUG-Anglais)
- des élèves britanniques en dernière année de secondaire et en première année d'Université.

A une exception près (136 élèves de PCEM), chaque groupe n'est interrogé que sur un seul test.

-
- * . Terminale D : dernière année d'études secondaires. Section scientifique.
 . Le D.E.U.G. (anciennement MP₁, MP₂) recouvre les deux premières années à l'université, et la "maîtrise" les deux suivantes.
 . La "Formation Permanente" s'adresse à des adultes ayant interrompu depuis longtemps leurs études secondaires pour exercer une activité professionnelle. Le but de cet enseignement est de rendre un tel public apte à suivre ultérieurement l'enseignement universitaire normal.
 . P.C.E.M. : première année d'études médicales, qui comporte un enseignement scientifique et est sanctionnée par un concours.

4. Textes des questions posées et résultats

Les questions sont repérées par un chiffre et une lettre. Le chiffre indique un type de problème, et la lettre repère une situation physique particulière choisie pour illustrer celui-ci. Les résultats sont donnés parfois sous forme succincte : les principaux types de commentaires seront alors illustrés in extenso dans la discussion.

4.1. Question 1 - Problème posé :

On présente deux systèmes physiques identiques du point de vue des champs de forces. Dans l'un et l'autre cas, on considère le mouvement d'une même masse. A un instant t_0 , les deux masses ont la même position et sont donc soumises à la même force. A cet instant t_0 , leurs vitesses sont différentes, l'une nulle, l'autre non nulle. Peut-on, en appliquant à la masse immobile dès l'instant t_0 une force supplémentaire $F_s(t)$, dont on dispose librement, rendre son mouvement identique à celui de l'autre masse, et ceci pour tout $t \gg t_0$. En bref, peut-on remplacer une vitesse initiale par une force ?

Cette question laissera peut-être le physicien perplexe : la "bonne réponse" est-elle qu'une impulsion convenable peut faire l'affaire, ou bien qu'en un intervalle de temps nul on ne peut obtenir une variation non infinitésimale de vitesse, si ce n'est au prix d'une force infinie ? Les réponses des étudiants dans leur grande majorité, situent le débat à un tout autre niveau, et sont parmi les plus limpides que l'on ait recueillies dans cette étude. Ce seront ces réponses, et non un débat a priori sur la solution, qui justifieront réellement l'intérêt de cette question.

4.1.1. Question 1a

On lance une balle (1) obliquement vers le haut. Dès qu'elle est lâchée, cette balle est soumise à la pesanteur à l'exclusion de toute autre force. On étudie son mouvement à partir de l'instant t_0 où elle passe au sommet de sa trajectoire. On appelle \vec{v}_0 la vitesse (horizontale) de la balle à cet instant t_0 . Au même instant t_0 , on lâche une autre balle identique (2), sans vitesse initiale. Dès l'instant t_0 , la balle 2 est soumise à une force supplémentaire F_s horizontale, qui s'ajoute à la pesanteur et dont on peut choisir à tout instant le sens et le module.

Peut-on choisir F_s pour que les balles 1 et 2 aient des mouvements identiques à partir de l'instant $t = t_0$, c'est-à-dire superposables à chaque instant (par une translation constante) pour $t \geq t_0$.

OUI

NON

☐☐

. Si OUI, comment doit-on choisir F_s ?

. Si NON, pourquoi ?

Résultats de la question 1a

. Les résultats bruts figurent au Tableau 1, où chaque ligne concerne une population différente. (Les élèves de PCEM proviennent, pour la plupart, de Terminale C).

TABLEAU 1 - Taux de réponses en question 1a

Elèves	OUI	NON	? ou RIEN
136 (PCEM _C)	47 %	42 %	11 %
39 (MP ₁)	50 %	11 %	39 %

. Les justifications, analogues pour les deux catégories d'étudiants, se répartissent ainsi :

Réponses OUI : elles sont justifiées par 30 % du total des élèves.

L'essentiel de ces réponses (14 %) mentionne plus ou moins explicitement une force horizontale qui s'exercerait sur la première balle (celle qui a une vitesse initiale).

"Oui... il faut que la force F_s soit de même sens et de même module que la force F_1 initiale de la première balle à tout instant (MP_1)"

"Oui, la force horizontale à exercer est identique à la première et doit être constante si l'on considère que la première (balle) n'est pas soumise à la résistance de l'air (PCEM)"

"Oui, $F_s = \text{constante}$ " (PCEM)

"Oui, le module de F_s doit être v_0 " (MP_1).

On trouve, pour le reste :

- . des calculs qui aboutissent à des formules du genre :

$$F_s = \frac{mv_0}{t}, \quad F_s = \frac{2v_0}{t}, \quad F_s = \frac{1}{2} \frac{F}{m} t,$$

- . quelques commentaires "magiques" : "la force doit fournir une vitesse v horizontale" (MP_1) ou bien "avec une force dont on dispose librement, on peut faire n'importe quoi" (PCEM)
- . une assimilation entre force et entraînement : "on peut mettre la deuxième balle une fois lancée, dans une soufflerie" (MP_1)
- . enfin quelques rares justifications (3 %) en terme d'impulsion. "Si on donne une impulsion très brève..." (PCEM), ou "Oui, il faut donner à la balle une impulsion... puis laisser la balle à la seule action de son poids" (MP_1).

Réponses NON : elles sont justifiées par 27 % du total des élèves en PCEM, et 10 % en MP_1 .

Les deux tiers des réponses "NON" sont fondées pour la plupart sur des considérations cinématiques correctement exploitées : moyennant souvent l'hypothèse supplémentaire $F_s = \text{cte}$, l'étudiant montre que les accélérations ou les mouvements, les "directions", les trajectoires ou les "équations" sont "d'espèces différentes", uniformément accéléré, "rectiligne", "parabolique"...

1 % seulement des réponses se fonde sur l'argument temporel : "en un dt nul, on ne peut..."

On trouve aussi, en faible proportion, les confusions évoquées plus haut :

"Non, dans le premier cas ($v_0 \neq 0$) la force horizontale (?) va en s'annulant, dans le deuxième cas, elle (F_s) est constante" (PCEM)

"Non, au bout d'un certain temps (!), la première balle ne sera soumise qu'à l'action de la pesanteur" (PCEM).

1 % du total des élèves répond "NON" avec une justification qui ne porte que sur les forces et ne spécifie rien des mouvements ; dans le premier cas, la force est verticale, dans le second, il y aurait une composante horizontale F_s . Les forces seraient différentes, les mouvements aussi.

4.1.2. Question 1b

Deux masses identiques M_1 et M_2 ($M_1 = M_2 = M$) sont suspendues respectivement à deux ressorts verticaux R_1 et R_2 , identiques eux aussi et donc de même raideur k . La position d'équilibre de chaque masse est aussi la même.

- La masse M_1 oscille librement autour de sa position d'équilibre. On étudie son mouvement en prenant comme origine des temps ($t = 0$) l'instant où la masse M_1 passe à sa position d'équilibre avec une vitesse v_0 orientée vers le haut.

- Au même instant $t = 0$, on lâche la masse M_2 à sa position d'équilibre, sans vitesse initiale, et en lui appliquant à partir de cet instant $t = 0$, une force supplémentaire F_s qui s'ajoute à la force de rappel du ressort R_2 et à la pesanteur (F_s peut varier au cours du temps).

Peut-on choisir F_s pour que, dès l'instant $t = 0$, les mouvements des deux masses soient superposables à chaque instant ?

OUI

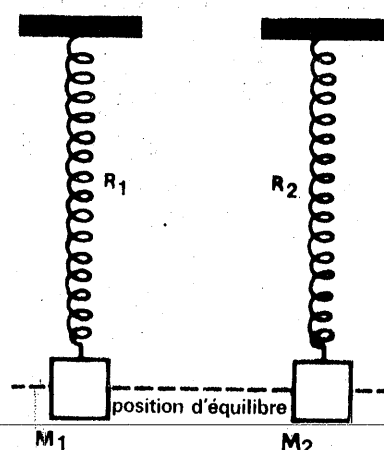
NON

☐
☐

Si OUI, comment doit-on alors choisir

F_s en fonction du temps ?

Si NON, pourquoi ?



Résultats de la question 1b

TABLEAU 2 - Taux de réponses à la question 1b

Elèves	OUI	NON	NE SAIT PAS
51 (MP ₁)	69 %	31 %	
50 (maîtrise)	80 %	18 %	2 %

Ces réponses sont justifiées dans les proportions suivantes (en pourcentage du total des élèves, respectivement en MP₁ et en Maîtrise) :

Réponses OUI (justifiées par 66 % et 80 % des étudiants) :

- 8 % et 30 % respectivement disent simplement que la force doit être "telle que" vitesse, accélération, amplitude, pulsation ou équation soient les mêmes pour les deux mouvements (14 % en Maîtrise ajoutent que F_s doit être "sinusoïdale" !).

- 10 % et 28 % font des calculs :

$$F_s = m \frac{dv}{dt}, F_s = 2m \left(g + \frac{d^2x}{dt^2}\right), F_x = m \frac{dv}{dt} + kx, F_s = -\omega^2 x,$$

$$F_s = (k - \omega^2) x \dots$$

- 10 % et 18 % comparent directement F_s à d'autres forces, sans l'intervention de données cinématiques :

" $F_s = mg$ ", " F_s légèrement supérieure à mg ",

" F_s = force de rappel de R_1 ", " $F_s = -kx$ ",

" $F_s > kx$ " (Maîtrise), " F_s = résultante des forces s'exerçant sur M_1 ".

- Les autres réponses se répartissent entre les catégories suivantes :

" F_s doit donner assez d'énergie pour..." , " $F_s = E_c$ ",

" $F_s = -ka$ ", "divers" dont quelques "impulsions" (2 %).

Réponses NON (28 % et 18 % des étudiants justifient cette réponse).

- 14 % et 8 %, respectivement, expliquent bien le problème :
 "si $dt = 0$, on ne peut donner une vitesse non nulle à une masse immobile" ou beaucoup plus rarement (0 % en PCEM, 8 % en MP₁) ;
 "s'il y a une force supplémentaire, les résultantes de forces sont différentes, et les mouvements aussi".

- 8 % en MP₁ font des confusions entre Force et Vitesse :
 "Non, la force de rappel du ressort sera plus grande que la force du ressort R_1 et la vitesse $v_2 > v_1$ ".

- 8 % en Maîtrise, se réfèrent à des chapîtres de leur cours : il s'agit dans un cas d'un mouvement sinusoïdal, dans l'autre d'un "régime transitoire".

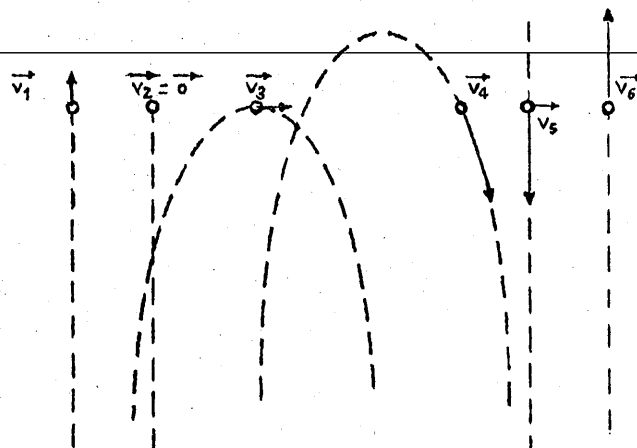
- 4 et 2 %, respectivement, répondent "diversement".

4.2. Question 2 - Problème posé :

Des masses égales, situées au même point d'un même champ de force, mais animées de vitesses différentes, sont-elles effectivement soumises à la même force ? Autrement dit, l'évaluation des vitesses contamine-t-elle celle des forces ? Là aussi plusieurs versions :

4.2.1. Question 2a

Un jongleur joue avec 6 balles identiques. A l'instant t , les six balles sont en l'air à la même altitude, sur les trajectoires indiquées en pointillé sur la figure. On a également représenté sur celle-ci les vecteurs vitesses des six balles à cet instant.*



* Le dessin ne suggérerait aucun moyen pour évaluer précisément les composantes ou le module des vecteurs.

1) Les forces s'exerçant sur ces balles à cet instant sont-elles

. les mêmes pour les 6 ?	. différentes pour chacune des 6 ?	. les mêmes pour certaines (lesquelles ?)	. différentes pour d'autres (lesquelles ?)

Justifiez votre réponse (on négligera la résistance de l'air).

2) Même question pour l'énergie potentielle des six balles.

Résultats de la question 2a

TABLEAU 3 - Taux de réponses à la question 2a

Elèves	Forces			Energies potentielles		
	toutes égales	certaines différentes	?	toutes égales	certaines différentes	?
29 (Term. D)	39 %	55 %	6 %	NON DEMANDE		
36 (MP ₁)	58 %	42 %		81 %	6 %	13 %

Les justifications sur les questions "Forces" sont analogues pour les deux catégories d'élèves interrogés. Les réponses sont presque toutes justifiées.

Réponse OUI : les trois quarts des réponses équivalent à celle-ci :

"seul le poids agit".

"Il n'y a que \vec{p} qui agit sur ces différents mouvements. $\vec{p} = m\vec{g}$ pesanteur sur masse".

D'autres disent que "l'altitude est la même".

"La vitesse au départ peut être différente mais les forces des balles sont inchangées. Les forces sont toutes égales. Si les forces n'étaient pas égales, les balles ne seraient pas au même endroit à l'instant t".

Réponse NON : elles se répartissent par moitié entre deux types :

. Les vitesses et les mouvements ultérieurs des balles, différents, justifient à eux seuls les différences entre les forces :

"la force qui s'exerce est $\vec{P} = m\vec{\gamma}$, suivant l'orientation que l'on donnera, la force sera la même pour v_4 et v_5 , et v_1, v_2, v_3, v_6 ".

"Sur le schéma, on constate qu'à l'instant t , toutes les balles sont à la même hauteur h . A l'instant $t+\theta$, on observe que la balle (1) continue à monter, la balle (2) redescendra tout de suite mais moins vite que la balle (5) car, à la hauteur h , $v_2 = 0$ tandis que la boule 5 est montée plus haut que h . La boule 6 au temps $t+\theta$ continuera à monter plus haut que la boule 1. Les boules 3 et 4 décrivent une parabole. La boule (4) arrivera au sol avant la boule (3)".

"1 = 2 = 5 = 6, \neq pour 3 et 4.

D'abord je dirai que les forces sont \neq pour chacune des 6 balles puisqu'à un temps t les vitesses ne sont pas les mêmes, mais à la réflexion, je dirai que seule la force du poids de la balle agit sur la balle et que l'accélération dans les cas 1, 2, 3, 4, 5, 6 est celle de la pesanteur.

La force dans les cas 1, 2, 5, 6 est $p = mg$.

La force dans les cas 3, 4 est $P =$ autre chose que mg ".

. Dans d'autres cas, on précise que les accélérations sont différentes, parce que les vitesses ou les mouvements le sont :

"Le poids s'exerce sur chacune des balles mais \neq selon les balles. L'accélération varie selon les \neq mouvements des balles".

"La force qui s'exerce sur chaque balle est $F = m\gamma$. Les balles étant identiques, c'est γ qui varie.

Pour v_1 , γ est positive. La balle continuera à monter.

Pour v_2 , γ est nulle. La balle redescendra.

Pour v_3 , γ est cte.

Pour v_4 et v_5 , γ est négative donc différente.

Pour v_6 , elle est positive".

"5 = 6, \neq pour 1, 4, 2? 3.

Les forces communiquées à chacune des balles leur donnent une accélération. Ces forces sont dirigées vers le haut pour 1, 2, 5, 6 et obliquement pour 3 et 4. Pour 2 et 3, leurs forces leur communiquent

une accélération $-g$ à l'instant t , la composante verticale de leur vitesse est nulle".

" $\vec{F} = m\vec{\gamma}$, $\vec{\gamma} = 0$ pour tout mouvement uniforme. Les forces sont égales pour 1, 2, 5, 6".

" $F = m\gamma$. Elles ne sont pas différentes pour chacune des six car $F = m\gamma$ et pour v_1, v_2, v_3 c'est un mouvement rectiligne uniforme, donc $\gamma = 0$. Les 3 forces sont égales à 0".

. D'autres enfin explicitent leur hésitation :

"Elles ont au moins une force commune : celle de leur poids puisque nous avons à faire dans les 6 cas à 6 balles identiques. J'hésite entre les 2 premières cases car si les vitesses jouent un rôle dans les forces, elles ont toutes une trajectoire différente. Sinon, elles sont soumises chacune à

- 1) leur poids P
- 2) à la résistance de l'air.

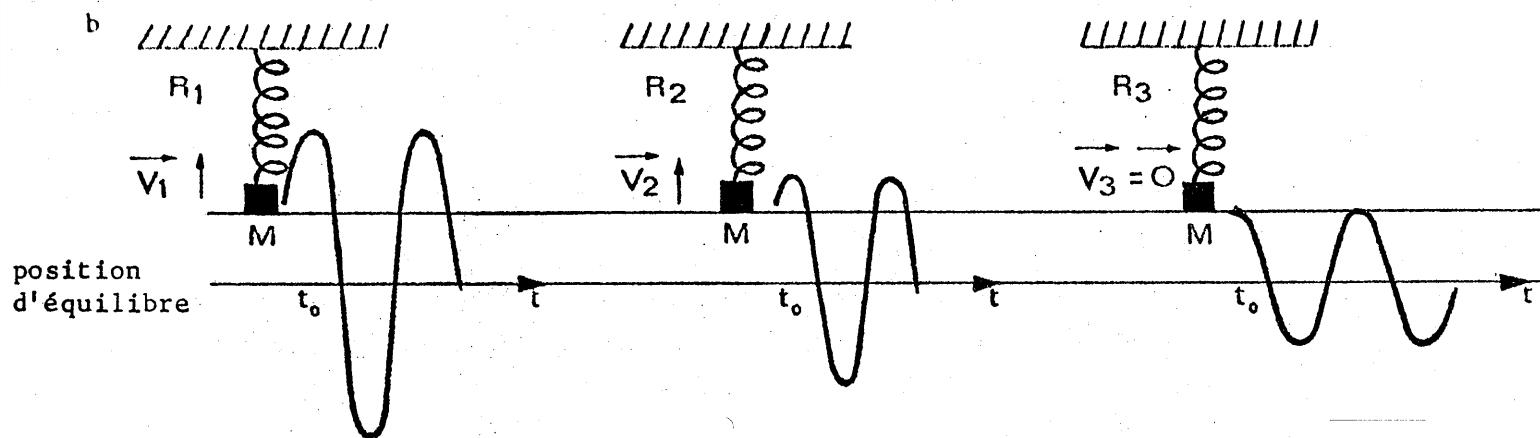
Dans ce cas, elles sont les mêmes pour les 6".

"La direction de ces six forces peuvent être différentes mais les forces s'exerçant sur ces balles sont toujours leur poids et l'attraction de la terre sur ces balles. J'ai simplement un problème pour v_2 dont la vitesse est alors nulle au même instant où les autres ont une vitesse existante. Dans ce cas, l'attraction est nulle, seul son poids s'exerce".

. Enfin, les énergies potentielles des balles sont identiques en MP_1 , quasi-unaniment, parce que "l'altitude est la même".

4.2.2. Question 2b

Trois ressorts verticaux identiques R_1, R_2 et R_3 exercent chacun sur une masse M ^{fixée} à leur extrémité une force de rappel $F = -kx$, où k est une constante et x l'élongation du ressort. M et k sont identiques pour les trois ressorts.



Les trois ressorts sont fixés au plafond et oscillent sans amortissement autour de leur position d'équilibre, avec des amplitudes différentes. A l'instant t_0 où l'extrémité de R_3 atteint son altitude maxima (avec une vitesse v_3 nulle), celles de R_1 et R_2 sont à la même altitude mais avec des vitesses v_1 et v_2 ($\neq 0$).

Les choses suivantes ...	sont-elles les mêmes ?	différentes ?	Pourquoi ?
Force exercée par le ressort sur le plafond			
Force totale agissant sur M			
Energie cinétique de M			
Energie potentielle de M			
Energie totale de M			
Accélération de M			

Résultats de la question 2b

A. Etudiants Français

TABLEAU 4 - Taux de réponses à la question 2b

		20 élèves MP ₁			49 élèves Maîtrise			95 élèves MP 2		
		identiques	différentes	RIEN	identiques	différentes	? ou RIEN	identiques	différentes	? ou RIEN
1	Force exercée sur le plafond F_p	70 %	30 %		67 %	27 %	6 %			
2	Force totale exercée sur la masse M F_T	70 %	30 %		37 %	55 %	8 %	48 %	40 %	12 %
3	Energie cinétique de M E_c	5 %	90 %	5 %		100 %				
4	Energie de M potentielle E_p	85 %	5 %	10 %	82 %	18 %				
5	Energie totale de M E_T		90 %	10 %	14 %	80 %	6 %			
6	Accélération de M γ	50 %	40 %	10 %	16 %	80 %	4 %			

* Expérience limitée faite à titre de contrôle

TABLEAU 5 - Corrélations (en nombre d'étudiants)

MP 1

F_T E_p	=	≠	?
=	12	5	0
≠	0	1	0
?	2	0	0

F_T γ	=	≠	?
=	10	0	0
≠	2	6	0
?	2	0	0

Maîtrise

F_T E_p	=	≠	?
=	17	19	4
≠	1	8	0
?	0	0	0

F_T γ	=	≠	?
=	6	6	0
≠	8	24	2
?	1	1	1

On remarquera, dans ces tableaux de réponses, les forts pourcentages de réponses fausses concernant les forces et l'accélération, et de réponses justes sur les énergies (Tab. 4), ainsi que l'absence d'une corrélation évidente entre "Force totale exercée sur M_1 (F_T)" et "Energie potentielle de M". La corrélation entre F_T et γ (accélération de M), plus marquée, n'est cependant pas totale.

Justifications : celles-ci sont analysées, schématiquement, en Tableau 6. Pour chaque question on lira, selon la réponse donnée (col. 2 : grandeur identique (=) ou non (\neq) d'un système à l'autre), le pourcentage d'étudiants ayant justifié sa réponse en référence à telle ou telle autre grandeur physique (col. 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9). Ce pourcentage est fourni, dans chaque rubrique, respectivement pour les élèves de MP_1 et ceux de Maîtrise. Il est toujours rapporté au total des élèves.

TABLEAU 6 - Types de justifications en Question 2b

questions	réponses justifiées		"-kx" ou force de rappel ou force...		x, élongation, position, altitude		M, mg poids		v vitesse	γ accélération		inertie	énergie potentielle		divers	
F_p force exercée sur le plafond	=		=		=		=									
	60 %	62	20 %	20 %	30 %	28 %	10 %	12 %							0	2 %
	\neq		\neq		\neq				\neq	\neq		\neq				
	30 %	24 %	15 %	0	5 %	14 %			10 %	0	0	6 %	0	4 %		
F_T force totale exercée sur la masse M	=		=		=		=			=			=			
	60	28 %	5 %	14	30	4	15	6		10	0		0	2 %	0	2 %
	\neq		\neq		\neq				\neq	\neq			\neq			
	30 %	50	25 %	2 %	5 %	12 %			0	10 %	0	18 %	0	6 %	0	2 %
γ accélération de M	=		=		=		=									
	50 %	12 %	40 %	10 %	10 %	0	0	2 %								
	\neq		\neq		\neq				\neq							
	40	57 %	0	8 %	15 %	2 %			15 %	35 %					10 %	12 %

Pour le reste, l'énergie potentielle est la même parce que l'élongation est la même, l'énergie cinétique est différente à cause des vitesses, et l'énergie totale est différente comme somme des deux premières, et ceci quasi unanimement.

Ajoutons que 25 % et 22 %, respectivement, fondent leur justification (x , v , F ou $\gamma \neq$) sur le cas particulier du ressort R_3 (" $v_3 = 0$ ", " F_3 , ou $\gamma_3 = 0$ ", ou "ressort au repos", "à l'équilibre").

B. Etudiants britanniques

Quelques étudiants de Guilford (Surrey) ont pu être interrogés grâce à l'amabilité du Professeur L.R.B. Elton. Les résultats correspondants ont une valeur plus indicative que statistique. On a regroupé deux groupes d'élèves de sections scientifiques différentes (dominante Mathématique ou Biologique) dans la rubrique "Terminale". Le troisième comprend des étudiants de Physique en première année d'Université.

TABEAU 7 - Taux de réponses à la question 2b (Guilford)

		14 élèves Terminale			14 élèves Université (1 ^{re} an)		
		identiques	différentes	RIEN	identiques	différentes	? ou RIEN
1	Force exercée sur le plafond F_p	43 %	50 %	7 %	50 %	50 %	
2	Force totale exercée sur la masse M F_T	64 %	36 %		57 %	43 %	
3	Energie cinétique de M E_c	7 %	93 %			100 %	
4	Energie potentielle de M E_p	43 %	57 %		79 %	21 %	
5	Energie totale de M E_T	21 %	64 %	15 %	7 %	93 %	
6	Accélération de M γ	50 %	50 %		36 %	64 %	

TABLEAU 8 - Corrélations

14 élèves "Terminale"

F_T Ep	=	≠	?
=	4	2	0
≠	5	3	0
?	0	0	0

F_T Y	=	≠	?
=	5	2	0
≠	4	3	0
?	0	0	0

14 élèves 1ère année Université

F_T Ep	=	≠	?
=	6	5	0
≠	2	1	0
?	0	0	0

F_T Y	=	≠	?
=	4	1	0
≠	4	5	0
?	0	0	0

On trouve, dans les justifications des deux groupes, des arguments tout à fait analogues à ceux de leurs homologues français (Tab. 5).

. "Forces ≠, because different rates of change of momentum

" Tension proportional to the lengths of the springs and these are different. The forces are different, because of the different amplitudes."

" As M_3 is stationary, it is not accelerating therefore there is no force..."

" M_3 is not moving therefore $F_3 = 0$, etc..."

" The acceleration for each body is different..."

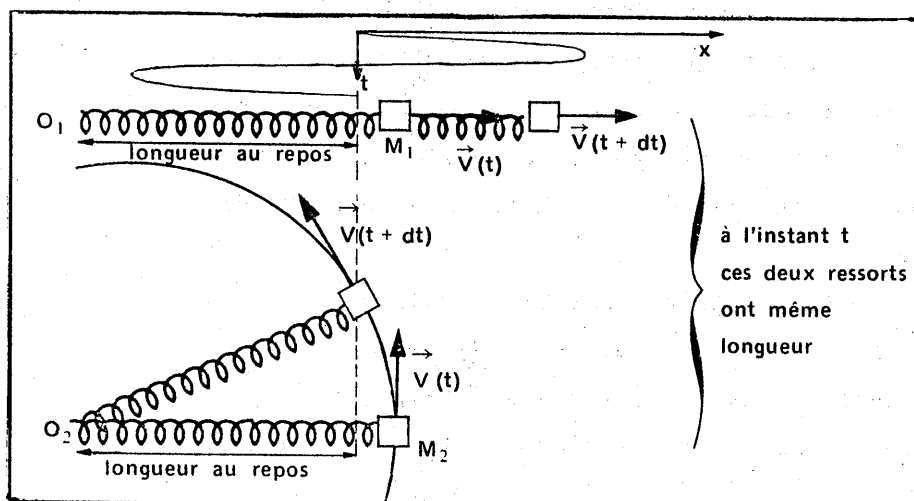
. "Forces = : the springs are all of the same length.

= : Forces depend on extension and it is the same.

. "Potential energy is the energy of position... the same height \Rightarrow the potential energy will be the same."

4.2.3. Question 2c

Deux ressorts strictement identiques R_1 et R_2 ont chacun leurs extrémités fixées l'une en un point d'une table horizontale (respectivement O_1 , O_2), l'autre à une masse (identique pour les deux ressorts : $M_1 = M_2$) qui peut se déplacer sans frottement sur cette table. L'une des masses, M_1 , oscille sur une trajectoire rectiligne colinéaire à l'axe du ressort R_1 : l'autre, M_2 , effectue un mouvement circulaire uniforme autour du point fixe O_2 . Les positions des deux masses à deux instants successifs t et $t + dt$ sont représentées ci-dessous.



Question : La force totale s'exerçant sur chacune des masses M_1 et M_2 à l'instant t est-elle identique pour les deux systèmes ?

OUI	NON

Pourquoi ?

Représenter sur les schémas ci-dessus les forces agissant sur M_1 et M_2 .

Résultats de la question 2c

39 étudiants de MP_1 ont été interrogés.

- 36 % ont répondu OUI sans mentionner l'expression $\frac{m v^2}{R}$, ni manifester d'erreur due au mouvement des masses. Les justifications sont, soit absentes, soit fondées uniquement sur l'examen des forces de rappel ou tensions des ressorts. Aucun schéma de forces.

"OUI, parce que la force est proportionnelle à l'allongement des ressorts".

"OUI, si à l'instant t , les ressorts ont même longueur, ils ont donc le même - $kx = F$ (...?) (sic)".

- 26 % répondent un OUI assorti de relations de type $-kx = \frac{mv^2}{r}$. Aucun schéma de forces.

"OUI : pour le ressort n° 2 $F = m \frac{v^2}{r} = kx$ (équilibre)

n° 1 $F = kx$ "

"Dans le premier cas, $F = -kx$,

Dans le deuxième cas, la force centrifuge = $\frac{mv^2}{r}$

C'est OUI car le prolongement est le même".

" $\frac{mv^2}{r} = kx \Rightarrow$ OUI (évident)".

- 38 % répondent soit OUI (17 %), soit NON (21 %) mais manifestent nettement, soit par un schéma (11 %), soit dans leur justification (27 %) l'existence de forces autres que les forces de rappel des ressorts.

"OUI, les forces sont égales, F_R est la même pour les deux ressorts.

Les autres forces : force centrifuge et force d'oscillation".

"OUI, il n'y a aucune force exercée sur chacun des deux systèmes.

(Schémas : fig. 1c)".

"OUI : pour le mouvement circulaire, force centrifuge, allongement de d. Pour le ressort qui oscille, même allongement, même force au temps t. (schémas : Fig. 1b)".

"NON. Les deux forces ne sont pas les mêmes, elles dépendent du mouvement..."

"NON, les mouvements ne sont pas de même nature. La force s'exerçant sur chacun des ressorts est différente".

"NON à t : sur 1 $\Sigma F = \vec{T}_1 + \vec{F}_1$

sur 2 $\Sigma F = \vec{T}_2 + \vec{F}_2$ mais $\vec{F}_1 \neq \vec{F}_2$

$$F_2 = \frac{mv^2}{l_0} \quad \vec{F}_1 = -\vec{T}_1 = kx$$

(schémas fig. 1c, forces \vec{T} : vers le point d'attache du ressort
forces \vec{F} : vers l'extérieur).

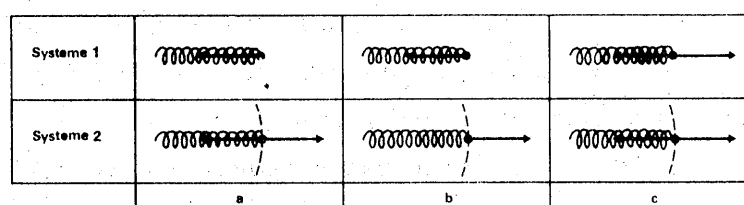


Figure 1 - Schémas de forces obtenus en réponse à la question 2c

Ce sont ces derniers commentaires qui nous ont conduit à distinguer, parmi les réponses "OUI", celles qui citent, ou non, l'expression $\frac{mv^2}{r} = -kx$. Rien n'est plus ambigu en effet que cette égalité formelle qui dispense en fait l'étudiant de se déterminer, de même d'ailleurs, que la simple égalité " $F = kx$, ou $-kx$ " : s'agit-il d'une force unique, ou du module commun à deux forces opposées, ou encore de forces parmi d'autres (cf. plus haut "les autres forces : force centrifuge et force d'oscillation") ?

On note que bien peu d'étudiants (5, soit 11 %) se soucient de lever cette ambiguïté par un schéma, pourtant demandé. Quatre de ces schémas écartèlent la masse M_2 (et pour deux d'entre eux, M_1 également) entre deux flèches opposées de même longueur. Le dernier tire M_2 vers l'extérieur par une seule flèche (fig.1).

- 14 étudiants littéraires ont été interrogés, en entretien individuel oral, sur le même texte.

Parmi eux, 4 ont répondu un "OUI" justifié par l'allongement du ressort. On trouve également :

- un OUI justifié par l'égalité des masses (1 et 2) : "... il me semble que, qu'elle soit en un point ou en un autre, c'est la même chose, elle tire de la même façon. Q : qu'est-ce qui tire quoi ? - La masse !... qui tire sur le ressort" ;
- des "OUI mais..." : "Les forces sont les mêmes mais elles viennent de directions différentes... Là (ressort 1) il y a une force qui va dans chaque sens, une qui tend à le faire aller par là puisqu'on le voit par là après, et puis une qui tend à faire revenir au point de départ. Et puis là (ressort 2), c'est pareil, et en plus, ça tourne" (Schémas : fig. 1a).
 "Si c'est la même longueur, c'est la même force, mais elle ne s'applique pas de la même façon".
 "Les forces sont différentes, mais le résultat est le même".
 "On ne peut pas juger sur les photos, il faut connaître le mouvement".
- 4 autres reconnaissent ne pas savoir répondre.

De façon générale, schémas et commentaires chez les étudiants littéraires, reprennent les mêmes configurations que celles des étudiants

de MP_1 , mais en les explicitant beaucoup plus souvent et parfois en les accentuant ("c'est la masse qui tire...").

4.3. Question 3 - Le problème posé n'est ici illustré que par une seule question : Deux balles identiques, de même masse, soumises à la même force résultante, ont-elles nécessairement le même mouvement ?

Résultats de la question 3.

TABLEAU 9 - Taux de réponse en question 3

Etudiants	OUI	NON
136 (PCEM _C)*	18 %	82 %

Les OUI sont diversement justifiés : "oui, à une translation près, si les vitesses sont différentes", "oui, les trajectoires sont différentes mais les mouvements sont les mêmes" ; "oui, puisque $\vec{F} = m\vec{\gamma}$ et que les forces sont les mêmes.

Les NON sont quasi unanimement justifiés par la différence éventuelle entre les vitesses initiales.

"NON, en intégrant, on constate que c'est seulement si les deux vitesses à l'origine des temps sont égales que le mouvement est le même".

"NON, ça dépend des conditions initiales (vitesses)".

"NON, car il peut exister au départ, indépendamment des forces identiques, une vitesse relative des deux balles".

* Les mêmes qu'en question 1a.

II. DISCUSSION DES RESULTATS

1. Force et Vitesse

Les situations proposées ici aux étudiants mettent en évidence de façon flagrante la tendance, manifeste dans le langage courant, qui consiste à interpréter un mouvement par l'existence d'une force de même sens. Et ce sont, bien sûr, les cas où cette interprétation conduit à une erreur qui retiennent d'abord l'attention, c'est-à-dire ici les tests 1 et 2. Les situations décrites dans ces tests ont en commun une propriété : aucune force d'interaction n'agit, à l'instant considéré, dans le sens des mouvements donnés (sauf pour quelques-uns des mouvements en q. 2a) : composante horizontale d'un mouvement de chute libre en q. 1a, mouvement vers le haut de masses oscillantes en q. 1b et 2b, mouvement vers le haut de balles en q. 2a, mouvement circulaire, et même "immobilité" au sommet d'une trajectoire, à un maximum d'élongation. Ces mouvements sont "incompatibles" avec les forces d'interaction présentes si l'on considère que pour expliquer le mouvement, il faut une force de même sens et que pour expliquer l'immobilité, il faut une force nulle.

Or, on observe que bon nombre d'étudiants se comportent alors comme s'il existait, entre Force et Vitesse, une relation $F = \alpha (V)$ telle que :

a) S'il existe une vitesse, ou une composante de vitesse, dans une direction donnée, alors il existe une force de même direction.

Les commentaires en q.1 (a et b) en témoignent largement. L'essentiel des nombreuses réponses OUI (on peut remplacer une vitesse initiale par une force pour obtenir le même mouvement...) à ces questions, mais aussi quelques réponses NON, se fondent non pas sur une éventuelle "impulsion" à fournir à la masse immobile, mais sur l'existence d'une force agissant sur la masse mobile, là où il n'y a, en fait, qu'une vitesse :

(q. 1a) "OUI, la force horizontale à exercer est identique à la première et doit être constante si l'on considère que la première (balle) n'est pas soumise à la résistance de l'air" (Traduction : la composante horizontale de vitesse de la balle 1 est alors constante, ce qui signifie que la force horizontale (?) est constante. Reproduire cette force revient à reproduire le mouvement).

(q. 1a) "NON : au bout d'un certain temps^{*} (!), la première balle ne sera soumise qu'à l'action de la pesanteur" (quand le mouvement sera pratiquement vertical...).

Cette équivalence entre Force et Vitesse, parfois brutalement exprimée :

(q. 1a) "OUI, le module de F_s doit être V_0 ",
se manifeste même... à la position d'équilibre :^{**}

(q. 1b) "OUI, F_s doit être égale à la somme des forces appliquées à M_1 quand celle-ci passe à sa position d'équilibre" (lu en MP_1 comme en Maîtrise !).

b) Si la vitesse d'un mobile est nulle, la force exercée sur ce mobile est nulle aussi.

Ainsi, en q. 2b, le cas du ressort R_3 , au maximum d'élongation, est fréquemment associé (20 % des cas, en France comme en Grande-Bretagne), à la réponse " $F_3=0$ " :

"Les forces sont différentes car la force pour R_3 est nulle tandis que pour R_1 et R_2 , elle n'est pas nulle" (MP_1).

"La force pour (les ressorts) R_1 et R_2 n'est pas nulle car la masse n'est pas à son amplitude maximum" (maîtrise).

* Le texte de la question spécifie le contraire en toutes lettres "dès qu'elle est lâchée, cette balle est soumise à la pesanteur, à l'exclusion de toute autre force".

** Le terme employé ici "équilibre" évoque l'immobilité. Dès lors, on comprend qu'en présence d'un mouvement, la "position d'équilibre" cesse parfois d'être associé à sa définition ($\vec{F} = 0$). On préférerait désigner cette notion en termes dynamiques : "position de Force nulle", ou quelque chose d'analogue...

" R_3 est en équilibre" (MP_1).

" $\gamma = 0$, donc $F = 0$ (pour R_3)" (Maîtrise).

" M_3 is not moving, therefore $F_3 = 0$ ".

"As M_3 is stationary, therefore there is no force".

De même la question 2a fait apparaître les "forces nulles" bien connues, au sommet des trajectoires de chutes libres verticales.

On peut trouver ici des confirmations en provenance d'autres sources. Citons par exemple les propos recueillis par Jean Migne (1970), chez des adultes, à propos du sommet de la trajectoire d'un projectile lancé vers le haut.

"A un moment il a perdu toute sa force de propulsion, la force qui lui a permis de monter et il arrête de monter, un très court instant il ne bouge plus et il tombe..." (Electricien, niveau CAP).

"Ici je pense qu'en arrivant à cette partie la force qui a lancé cet objet là diminue donc, j'en reviens toujours à ça, c'est justement cette attraction qui est sur la terre qui, en annulant la force qui l'a projeté fait retomber cet objet, qui finalement n'est plus supérieur à un moment donné à la pesanteur" (Aide technique en radiologie, niveau CEP).

- c) Si les vitesses sont différentes en direction et/ou en module, ou plus généralement si les mouvements de deux mobiles sont différents, alors les forces exercées sur ces mobiles sont différentes.

De 30 à 55 % d'étudiants répondent , en question 2, un NON ainsi justifié, la plupart du temps :

(q. 2a) "Les forces sont différentes puisque les vitesses le sont".

(q. 2c) "Les forces sont différentes, elles dépendent du mouvement".

On en viendra même à dire, en q. 2b, que les élongations sont différentes, contre toute évidence, du moins contre celle de la figure.

Certaines justifications mentionnent spécifiquement le paramètre "orientation" :

(q. 2a) "La force qui s'exerce est $\vec{P} = m\vec{\gamma}$, suivant l'orientation que l'on donnera, la force sera la même pour v_4 et v_5 , et v_1, v_2, v_3, v_6 " ou bien :

(q. 2c) "Les forces sont les mêmes mais elles viennent de directions différentes".

Cette relation $F = \alpha(V)$ a donc, pour résumer, les propriétés suivantes :

1. $V \neq 0 \Rightarrow F \neq 0$ (même si $\gamma = 0$), de mêmes direction et sens
2. $V = 0 \Rightarrow F = 0$ (même si $\gamma \neq 0$)
3. $V_1 \neq V_2 \Rightarrow F_1 \neq F_2$ (même si $\gamma_1 = \gamma_2$).

Les occasions ne manquent pas de retrouver, hors du cadre de cette enquête, et sous d'autres formes, les traces de cette équivalence entre Force et Vitesse.

Le langage courant est riche d'expressions identifiant les deux notions : "courir fort, courir vite", "un fort vent de 120 km/h", etc. On y reviendra plus loin (partie V).

Mais il n'est pas rare non plus, en situation d'enseignement, d'observer des schémas composant une force avec une vitesse. Il arrive aussi que la composition de deux vitesses soit retraduite en composition de deux forces. Les enquêtes faites sur les changements de repère chez les étudiants (J.L. Malgrange, E. Saltiel, L. Viennot (1975), E. Saltiel (1977)), font clairement apparaître, en particulier, ces types d'erreurs. Plus généralement, ces enquêtes mettent en évidence les conséquences de l'intrusion de facteurs dynamiques dans des raisonnements portant sur des problèmes que le physicien qualifie de "purement cinématiques".

L'importance des facteurs dynamiques dans la conception même de la vitesse, fondant les notions de vitesse vraie, propre, par l'existence du moteur associé, ressort nettement de la même série d'enquêtes, notamment chez les enfants (L. Maury, E. Saltiel, L. Viennot, 1977).

2. Délocalisation spatio-temporelle de la force

Avant de pousser plus loin cette analyse, il faut remarquer que bien des formulations incorrectes d'un point de vue formel, et quelquefois citées ici à l'appui du modèle $F = \alpha(V)$, deviendraient exactes si l'on spécifiait que les forces dont il est question ne sont pas celles qui s'exercent à l'instant t , mais celles qui ont "causé" le mouvement. Il semble parfois qu'il y ait décalage implicite dans le temps entre la question posée et les termes de la réponse, ou bien même entre certains termes de la réponse :

(q. 1a) "OUI, à t_0 , la première balle est soumise à la pesanteur et à une certaine force avec laquelle on l'a lancée." (Il s'agit d'un décalage important puisqu'on a spécifié dans le texte que la balle est lancée "obliquement" et que t_0 est l'instant où elle passe au sommet de la trajectoire).

(q. 2b) "The forces setting the masses in motion are different".

Dans certains cas, il devient même pratiquement impossible d'avancer une hypothèse cohérente sur la manière dont l'étudiant situe son raisonnement dans le temps.

(q. 1a) "OUI, il faut que la force F_g soit de même sens et de même module que la force F_1 initiale, à tout instant".

Il est donc très probable que la Force dont il est question dans ces commentaires du type $F = \alpha(V)$, est fortement délocalisée dans le temps et, par le jeu de la relation espace-temps associée au mouvement, dans l'espace également. Liée au mouvement, elle n'est attachée ni à un instant

déterminé de ce mouvement, ni à un point précis de l'espace (sinon lorsqu'elle s'annule. Encore, dans ce dernier cas, reste-t-elle une caractéristique du mouvement et non d'un point déterminé d'un champ de force).

3. Intervention spécifique de la relation $F = \alpha(V)$. La question 3

Nous avons souligné une caractéristique commune aux situations 1 et 2 : les mouvements sont "incompatibles" avec les forces d'interactions. Mais il faut aussi remarquer la forme des questions : les données sur les mouvements ne sont pas le résultat de calcul, par exemple, mais sont immédiatement accessibles. De plus, dans l'énoncé de la question 2, seules ces données diffèrent d'un système à l'autre. Il semble que, dans ces conditions, elles focalisent l'attention et soient prises comme données de départ. Les données statiques, l'expression formelle des champs de forces, la définition même de l'équilibre s'effacent devant l'évidence de ces mouvements différents.

Mais qu'en est-il si les forces d'interaction sont seules données et s'il s'agit cette fois d'en tirer des conclusions quant aux mouvements ? Les résultats obtenus à la question 3 (même masse et même force \rightarrow même mouvement) confirment d'autres faits recueillis en cours d'enseignement. Les erreurs fondamentales enregistrées plus haut n'apparaissent pas dans ce cas (82 % de réponses correctes). La quasi-totalité des justifications s'appuient sur les différences éventuelles entre vitesses initiales, et la force y apparaît bien comme liée à une variation de la vitesse et non, comme plus haut, à la vitesse elle-même.

On constate enfin, en enseignant, que si le mouvement est donné sous une forme dépourvue de tout contenu intuitif, par ses équations horaires par exemple, c'est encore bien la force d'interaction correcte qui intervient. Les étudiants calculent l'accélération et non la vitesse pour trouver la force.

On enregistre donc un comportement bien différent selon qu'il s'agit, ou non, d'expliquer un mouvement directement accessible à l'intuition.*

Comment peut-on interpréter cette incohérence apparente des étudiants, dans l'usage qu'ils font d'un même terme : force, et dans les liens qu'ils construisent entre ce concept et celui de Mouvement ?

Cette question conduit à remettre en cause l'affirmation traditionnelle qui met toutes les difficultés - historiques et actuelles - de la mécanique sur le compte des frottements. Dans le monde réel, les frottements sont partout présents et l'on observe souvent des mouvements dont la vitesse a atteint sa valeur limite. Cette vitesse limite a mêmes direction et sens que la force agissante, et son module est une fonction croissante du module de la force. On pourrait voir là l'origine de l'erreur d'Aristote, ou des réponses étudiées ici.

Mais si l'on s'en tient à cette seule hypothèse, on voit mal pourquoi les étudiants réagissent très différemment selon la forme des questions, et pourquoi ils associent parfois très clairement la Force à l'Accélération et non à la Vitesse.

On peut aussi remarquer que, malgré l'existence des frottements, les occasions ne manquent pas, dans la vie courante, d'observer des mouvements dans leur phase accélérée.

Il faut donc avancer d'autres hypothèses.

4. "Force" : deux notions différentes

L'interprétation qui vient pourrait se résumer par l'expression d'un étudiant, lue au cours d'une autre enquête (Malgrange, J.L., Saltiel, E., Viennot L., 1973) : "quantité de mouvement : capital de force qui se conserve". On retiendra dans cette phrase l'association entre

* Le lecteur aura compris, sans doute, que l'on ne trace pas ici une limite précise mais que l'on définit tout au plus deux pôles extrêmes.

mouvement et force, dans une formulation assez rare sous cette forme explicite, mais qui rend bien compte de résultats enregistrés ici : relation $F = \alpha(V)$, pour une "force" largement délocalisée dans le temps, tenant lieu de cause au mouvement lorsqu'aucune force d'interaction présente ne semble remplir cette fonction. L'idée de capitalisation permet en effet ces glissements dans le temps grâce auxquels la cause (force d'interaction) peut rejoindre l'effet (mouvement). Elle va de pair avec une conception très quantitative de la force, conçue comme une grandeur que l'on ajoute ou que l'on retranche, éventuellement "d'un seul coup" (impulsion), mais sans que le temps intervienne nettement.

La force d'interaction réelle intervient sur le capital pour le modifier dans un sens ou dans l'autre : le geste du lanceur constitue le capital de force, la pesanteur "épuise la force de la balle vers le haut"... Si l'on note F_c le capital lié au mouvement et F_{ex} la force d'interaction liée aux actions extérieures, intervenant sur le capital, on peut écrire un système de relation cohérent

$F_c = \alpha(V)$, $F_{ex} = \Delta F_c = \alpha(\Delta V)$ où le symbole Δ prend un sens très vague : "variation de...".

Le terme de force, dans cette interprétation, renvoie donc à deux notions :

- La force d'interaction réelle notée ici F_{ex} , fonction de point déterminant une variation de la vitesse ($F_{ex} = \alpha(\Delta V)$). L'intervention de cette notion dans les raisonnements des étudiants traduit une approche "statique" ou "locale" de la situation proposée, en ce sens que ce sont les positions des éléments du système qui sont d'abord considérées. Elle répond à la formulation "force exercée sur..." (la masse). Elle suffit pour interpréter le mouvement lorsqu'il est dans le même sens qu'elle, et pour le construire, lorsqu'il n'est pas donné (aux difficultés de calcul près). Conforme au modèle formel, c'est celle qui intervient lorsque le mouvement n'est accessible que par son expression analytique.

- Le capital de force, F_c , notion liée au mouvement et délocalisée, fonctionnant conformément à la relation $F_c = \alpha(V)$. Ce type de force intervient lorsque le mouvement s'impose à l'intuition comme donnée de départ

et d'autant plus que celui-ci semble incompatible (voir plus haut) avec la force d'interaction. Il tient alors lieu de cause au mouvement. Il correspond chez les étudiants à l'expression "Force d'une masse" et à l'idée de capitalisation : "il lui reste de la force". *

Ces deux notions constituent évidemment deux pôles extrêmes entre lesquels un étudiant donné oscillera de façon plus ou moins aléatoire. Cependant les propriétés de ces notions, ainsi que leurs conditions d'intervention dans le raisonnement spontané, constituent un embryon de modèle** susceptible de bien représenter des tendances d'ensemble. Elles sont représentées schématiquement dans deux tableaux récapitulatifs (10 et 11), sur lesquels figure également un autre type de force que nous discuterons plus loin.

* Madame L. Leboutet (1969, 1976) examine la forme grammaticale employée par des adolescents de 11 à 17 ans à propos du mot Force. Elle note une prédominance d'expressions où le mot Force intervient comme complément d'objet du verbe avoir : "la masse a de la force".

** De ce terme de "modèle", on retiendra :

- sa fonction représentative, que pourrait résumer l'expression :
"tout se passe comme si..."
- l'idée que les notions mises en oeuvre dans le raisonnement spontané sont, dans une certaine mesure, organisées.

En revanche, ce terme ne doit pas laisser croire que l'organisation en question est aussi stable et contraignante que celle d'une véritable théorie (par exemple celle que l'on enseigne).

TABLEAU 10 - Différents types de forces intervenant dans les raisonnements spontanés

Notion	Abrév.	Formulation étudiant	Type de grandeur	Localisation	Modèle utilisé par l'étudiant	Confusions Force-Energie
Force d'interaction	F_{ex}	Force exercée sur la masse	Orientée (vectorielle ?)	Fonction de point localisation spatio-temporelle	$\vec{F}_{ex} = m \vec{\gamma}$ $\vec{\gamma}$ accélération	NON
Capital de Force	F_c	Force de la masse	Mixte : vecteur-scalaire	Liée à l'ensemble du mouvement - délocalisation spatio-temporelle	$F_c = \alpha (V)$	OUI (voir Tab. 12)
Force d'inertie liée à un changement référentiel	F_i	Force, Réaction d'Inertie de la masse	Orientée (vectorielle ?)	Réaction instantanée, localisation temporelle	$\vec{F}_i = -m \vec{\gamma}_E$ ($\vec{\gamma}_E$: acc. "d'entraînement")	NON

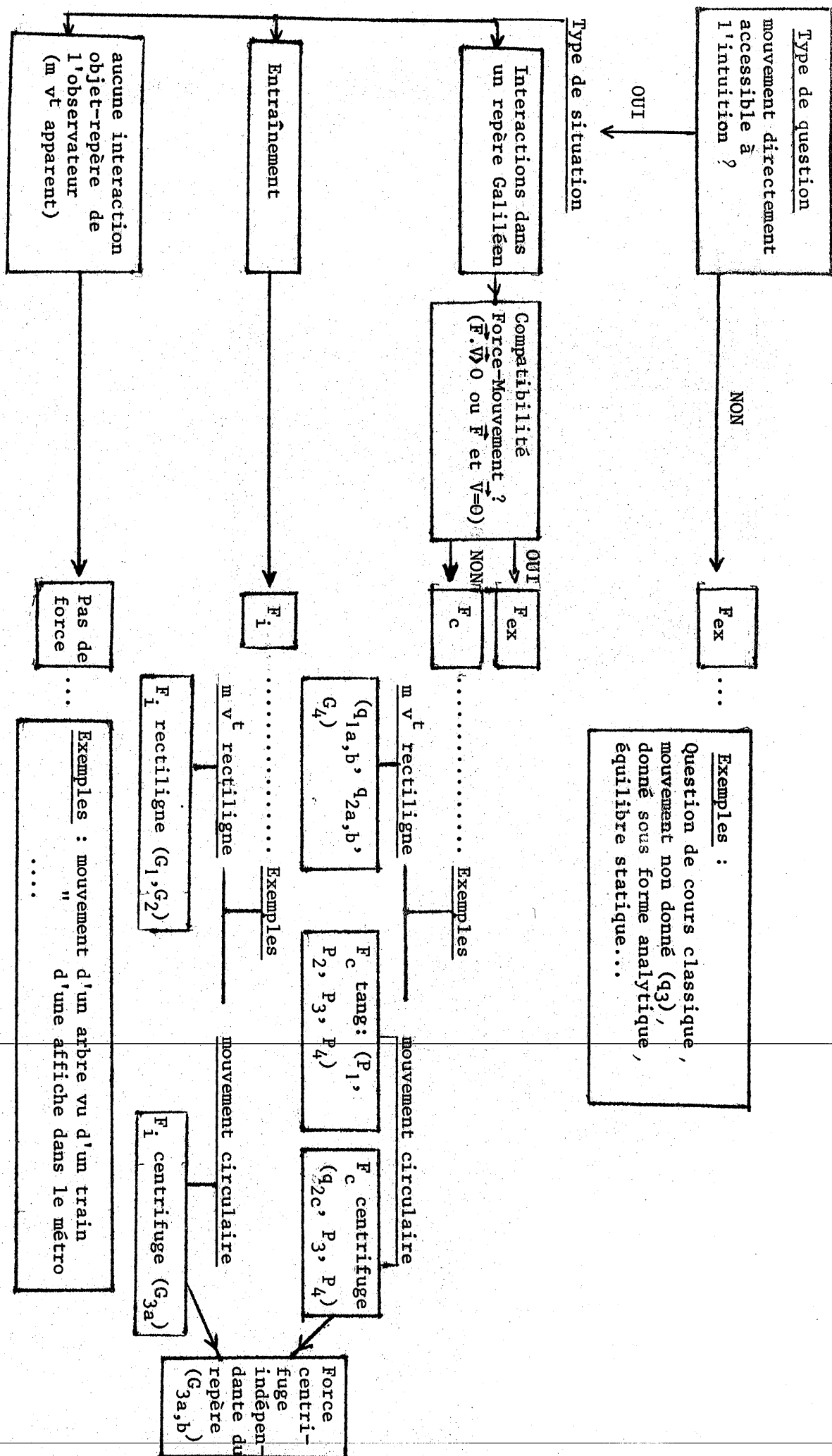


TABLEAU 11 - Conditions d'intervention des différents types de force répertoriées en Tableau 10

(On cite dans les exemples les questions illustrant le plus nettement chaque point du modèle. Certaines de ces questions sont exposées plus loin, en partie II).

5. Force et Energie

Il reste à situer l'énergie par rapport à ces deux premiers types de forces, ou ces deux approches différentes d'un problème physique. A l'évidence, l'énergie a sa part dans le capital de Force défini plus haut.

On a pu mesurer ailleurs* combien cette notion d'Energie était malléable et combien ses propriétés changeaient selon les circonstances : tour à tour vectorielle ou scalaire, identifiée à sa "cause" ou au processus de transfert ("travail = force qui déplace son point d'application", "travail = quantité d'énergie d'une certaine force"), à la quantité de mouvement aussi ("p = grandeur qui caractérise l'état énergétique d'un corps"). Capitalisable, liée à la vitesse et "cause" par excellence, cette notion trouverait bien sa place au lieu du mot "force" dans bien des commentaires cités plus haut. Plusieurs réponses font d'ailleurs référence à l'Energie (potentielle, cinétique ou non spécifiée) explicitement :

$$(q. 1b) \text{ "F}_s = E_c \text{ " (MP}_1\text{)}$$

ou par l'intermédiaire de l'amplitude maxima :

$$(q. 1b) \text{ "F}_s = -kx_0, x_0 \text{ amplitude maxima" (Maîtrise).}$$

Ou encore :

$$(q. 2b) \text{ "Les forces sont différentes, car } V_1 \text{ remonte plus haut que } V_2 \text{ " (MP}_1\text{).}$$

Plus généralement, il faut remarquer combien l'attitude des étudiants rejoint ici les formulations aussi courantes chez les enfants que banales chez les adultes où les expressions "force, élan, vitesse, puissance... d'un mobile" s'équivalent et s'interchangent allègrement. Ainsi, J. Migne (1970) cite, à propos du mouvement vers le haut d'un projectile, des explications d'adultes qui attribuent le même rôle causal aux grandeurs ainsi désignées, entre autres :

"On lui a donné un certain mouvement, une certaine vitesse".

"La force avec laquelle on l'a lancée".

"L'élan qu'on lui donne".

"L'énergie cinétique qui le pousse".

"La force de montée".

"La propre inertie que je lui aurai imposée... (c'est-à-dire)... la force que j'ai donnée à mon mouvement pour lui permettre de s'élever".

* Malgrange, J.L., Saltiel, E., Viennot, L. (1973)

L'expression "force cinétique", rencontrée lors d'une autre enquête (E. Saltiel, 1977), est dans la même ligne.

Le capital de Force est donc vraisemblablement une notion mixte, mi-scalaire (comme un capital, comme l'énergie), mi-vectorielle (comme la Force).

Mais ce type de confusion entre Force et Energie ne se fait pas dans des conditions complètement indifférentes. Les circonstances dans lesquelles apparaît la force F_{ex} (voir Tableau 11) ne semblent pas, en elles-mêmes, déterminer d'erreurs spécifiques. Notamment ici la question 3 n'est pas l'occasion de la moindre allusion à l'Energie. Ces confusions interviennent lorsqu'il faut rendre compte d'un mouvement et que l'on s'interroge sur des Forces (conditions d'intervention du Capital de Force). Qu'en est-il si l'on questionne les étudiants sur l'Energie en tant que telle ? Les résultats obtenus en questions 2 permettent de répondre (Tableau 12) : les Energies cinétique, potentielle et totale sont, bien plus que les forces, manipulées pour elles-mêmes, conformément au modèle formel.

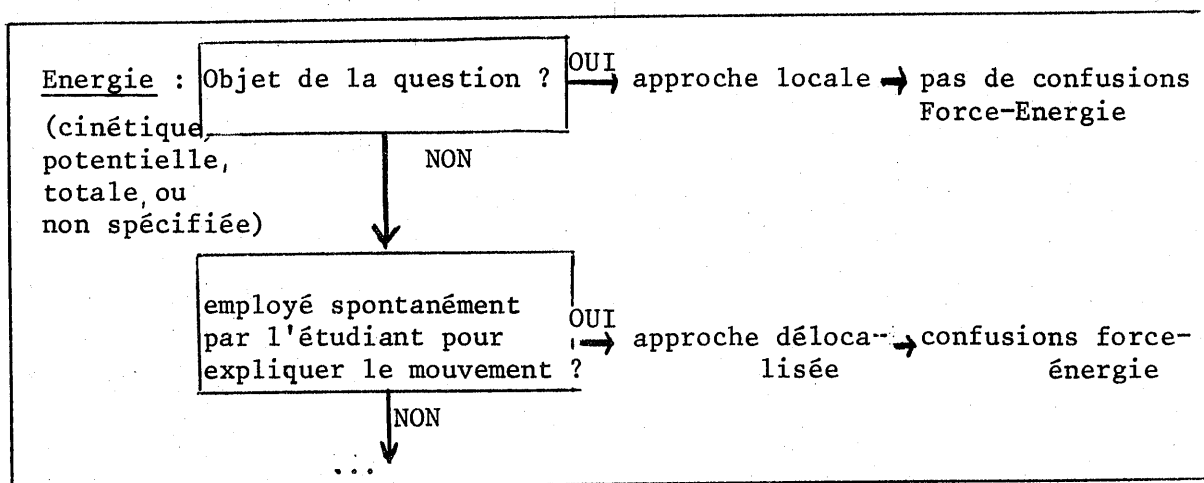
L'énergie cinétique, directement liée à la vitesse instantanée, ne pose, en question 2b, aucun problème. Il est plus remarquable que, sur les Energies potentielles, les taux de réponses exactes aux questions 2a et b se répartissent entre 79 et 85 %* alors que sur les Forces, ces taux n'atteignent que 37 à 70 %.

Cette disparité s'accompagne parfois de contradictions explicites (20 % en MP_1) sur lesquelles on reviendra :

" - kx est différent suivant les ressorts...
 $\frac{1}{2} kx^2$ est le même pour les trois systèmes".

* Seule exception (43 %) : un groupe restreint de 14 élèves de Terminale en Grande-Bretagne. Les élèves de Terminale, en France, n'ont pas été interrogés sur l'Energie potentielle.

Cette incohérence montre bien qu'il s'agit de deux approches très distinctes, l'une délocalisée (pour la Force), l'autre "statique" ou "locale"* (pour l'Energie potentielle), et de mécanismes suffisamment puissants l'un et l'autre pour ne pas s'embarrasser de contradictions, pourtant flagrantes d'un point de vue formel. La même situation physique peut donc donner lieu à des comportements bien différents selon la question posée (Force... ? ou Energie...?) et le même terme, Force, ou Energie, être utilisé par les étudiants de manière non moins différente, selon qu'il est envisagé pour lui-même ou bien comme élément explicatif d'un mouvement (Tableau 12).



TAB. 12 - Tendances du raisonnement spontané

- . Concernant l'Energie
- . Dans les conditions propices au "Capital de Force" (Tab.11)

III. QUELQUES HYPOTHESES SUR LES FORCES D'INERTIE ASSOCIEES AUX SITUATIONS "D'ENTRAINEMENT"

Les "forces" mises en évidence plus haut sont, de plus ou moins près, rattachées à des interactions effectives entre objets. Elles interviennent dans des situations physiques où rien ne suggère plusieurs référentiels. Celui qui se présente serait qualifié "d'approximativement Galiléen" par le physicien. Mais il est un autre cas où le mouvement est

* Les élèves britanniques emploient d'ailleurs l'expression intéressante : énergie de position.

communément associé à une force, en l'absence pourtant de toute interaction au sens du physicien : un objet physiquement lié à un "repère en mouvement" du genre véhicule, par une histoire commune sinon par une interaction au sens strict du terme, se verra soumis à des "forces d'inertie" qui sont liées au mouvement du véhicule.

Sur ce point, nous commencerons par quelques constatations générales, qui reposent essentiellement sur une certaine pratique enseignante. La confrontation de ces remarques et des résultats exposés plus haut conduit à formuler quelques hypothèses qui complètent le modèle du raisonnement spontané que l'on vient d'esquisser (Tableaux 10, 11). Ce sont deux expériences exposées plus loin (Partie II) qui viendront confirmer, a posteriori, la valeur prédictive de ces hypothèses.

1. Forces d'inertie et Capital de force

Tout le monde a pu faire l'expérience dans les divers moyens de transport qu'il utilise des effets inertiels d'une augmentation de vitesse, d'un coup de frein, d'un virage. Les forces d'inertie alors invoquées sont nettement associées à l'accélération, et non à la vitesse du véhicule. Les discussions sur ce point donnent souvent lieu à des explications formulées en termes d'Action-Réaction, relativement bien localisées dans le temps : du côté de l'action, il y a le véhicule, le mouvement d'entraînement et son accélération instantanée ; du côté de la réaction, il y a l'objet véhiculé, la Force d'Inertie ("Réaction d'Inertie", "Réaction centrifuge"), le mouvement relatif. Dans le cas simple d'une vitesse initiale relative nulle, le seul que l'on envisagera ici, la prévision du mouvement relatif, son explication par des Forces, répond donc assez généralement au schéma suivant : l'objet part dans le sens d'une Force d'inertie $\vec{F}_i = -m\vec{\gamma}_E$ ($\vec{\gamma}_E$ est l'accélération d'entraînement). En ceci, la définition courante de ces forces d'inertie rejoint ce que l'on a pu appeler, dans un modèle formel de la mécanique, les "forces fictives". Mais il y a loin entre cette mise en relation $\vec{F}_i = -m\vec{\gamma}_E$ et une réelle compréhension du statut de ces "forces fictives", essentiellement liées au repère "mobile" et qui n'existent pas dans un repère galiléen, sous peine de fausser complètement les rouages

du modèle newtonien : on a bien souvent l'impression que cette force qui, au démarrage, assied prématurément le voyageur du métro sur (ou à côté) de sa banquette, est assimilée à la poussée d'un mauvais plaisant et il est bien difficile de faire admettre que la seule réalité physique galiléenne est celle-ci : le plancher du métro a tiré sur les pieds du monsieur.

Si les forces d'inertie prennent ce caractère de grandeur physique intrinsèque, ne se rapprochent-elles pas des "forces" que les étudiants utilisent pour expliquer les mouvements dus à des interactions dans un seul repère "fixe" ?

En quoi se distinguent-elles notamment de ce Capital de Force, lui-même si étroitement attaché au mouvement, et si souvent désigné ainsi "élan, inertie..." ?

Nous examinerons successivement deux cas simples : le mouvement rectiligne et le mouvement circulaire uniforme, confrontant pour chacun les deux points de vue détaillés plus haut et qui apparaissent, en principe, l'un dans des situations à un seul repère "fixe", l'autre dans un contexte d'entraînement (objet lié physiquement à un repère intermédiaire "mobile").

2. Mouvement rectiligne

Lorsqu'il s'effectue en l'absence de toute force d'interaction de même sens, un tel mouvement, on s'en souvient, s'explique par une "force" bien particulière : Capital de force accumulé grâce aux interactions antérieures et justifiant l'évolution ultérieure de la masse, donc lié à l'ensemble du mouvement quand ce n'est pas spécifiquement à sa vitesse. Tour à tour, "force de la masse", "élan", "force cinétique", "capital de force" ou "inertie", cette force F_c qui apparaît dans des situations à un seul repère, ne semble pas bien différente a priori de la force d'inertie qui projette en avant le passager d'une voiture qui freine.

Plus précisément, et pour reprendre l'exemple traité plus haut : une masse située à l'extrémité libre d'un ressort oscille en un mouvement

harmonique rectiligne sur un plan horizontal qui soutient l'ensemble sans frottement (q. 2c). On l'observe quand elle s'éloigne de la position d'équilibre. Son mouvement est alors "incompatible" avec la force de rappel. C'est, disons-nous, le "capital de Force", F_c , de la masse, de même sens que le mouvement, qui justifie ce dernier. Mais il ne serait pas besoin d'aménager beaucoup cette situation pour se ramener au cas d'un entraînement : à l'extrémité du ressort se situe un plateau sur lequel est collée la masse M précédente. Dans la même phase du mouvement, le plateau est freiné. De ce point de vue, la masse M située sur le plateau est soumise à une force d'inertie F_i , de sens contraire à l'accélération, donc, ici, dans le sens du mouvement. Lorsqu'un étudiant littéraire, en question 2c, déclare à propos de la masse : "c'est elle qui tire le ressort !", ne ferait-il pas allusion à cette Force F_i ?

Y a-t-il même réellement une différence entre F_c et F_i , deux notions parfois désignées par le même terme "inertie" *, et qui apparaissent dans des situations si voisines ? Il est difficile de conclure. Les fonctions explicatives de ces concepts sont sans doute très proches. Mais on observe, au niveau du comportement des étudiants, des différences significatives :

- Les forces F_c sont associées à la vitesse du mouvement et les forces F_i à l'accélération du véhicule.

- Les forces F_c apparaissent essentiellement lorsqu'il y a "incompatibilité" entre mouvement et forces d'interaction (fig. 2a) et non lorsque mouvement et forces d'interaction sont de même sens (fig. 2b).

Les forces F_i , au contraire, surgissent aussi bien dans un cas (fig. 2a) que dans l'autre (fig. 2b), que le véhicule freine ou accélère.

* Ce terme prend d'ailleurs dans les manuels scolaires, français ou anglo-saxons, les sens les plus divers.

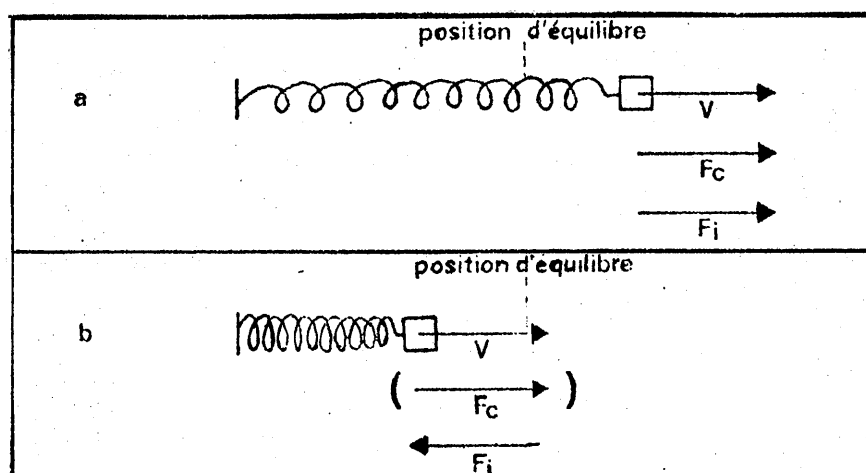


Fig. 2 - Sens des forces F_c et F_i pour un mouvement rectiligne

On note au passage que les forces F_c et F_i n'apparaissent simultanément que dans un cas où elles sont de même sens. Il n'y a donc pas de véritable occasion de conflit entre ces deux notions voisines, et donc pas non plus de raison de mettre en cause, ou de préciser, ces éléments vagues mais suffisants d'un système explicatif intuitif.

3. Mouvement circulaire uniforme

Lorsqu'on aborde le mouvement circulaire uniforme, l'écart paraît encore plus mince entre les modes d'explication liés à un repère "mobile" et ceux qui ne s'y rattachent pas. La force centrifuge, on le sait, est loin d'être confinée au "repère tournant". Elle apparaît tant et plus pour expliquer des situations où rien n'indique un repère intermédiaire, une pierre que l'on fait tourner au bout d'une ficelle pour ne citer que la plus simple, ou bien, ici, la question 2c.

Celui-ci présente, en effet, à côté d'un mouvement harmonique rectiligne que l'on vient de décrire, la même force d'interaction (mêmes positions des éléments du système) intervenant lors d'un mouvement circulaire cette fois. Et l'on retrouve tout à fait, pour cette question, les explications du type capital de force : mouvements différents, donc forces différentes, ou bien : forces (d'interaction) égales mais existence

schéma correct

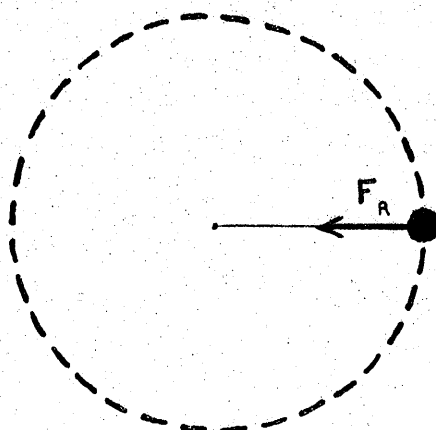


schéma souvent
observé

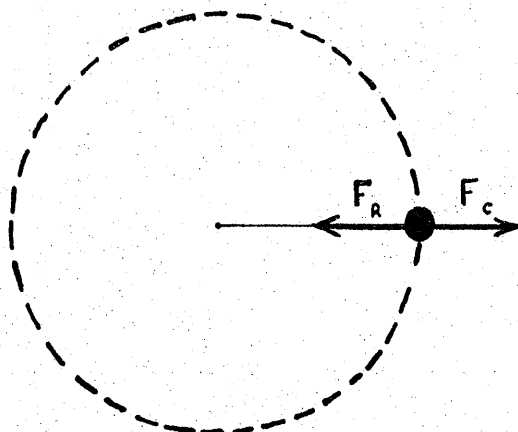


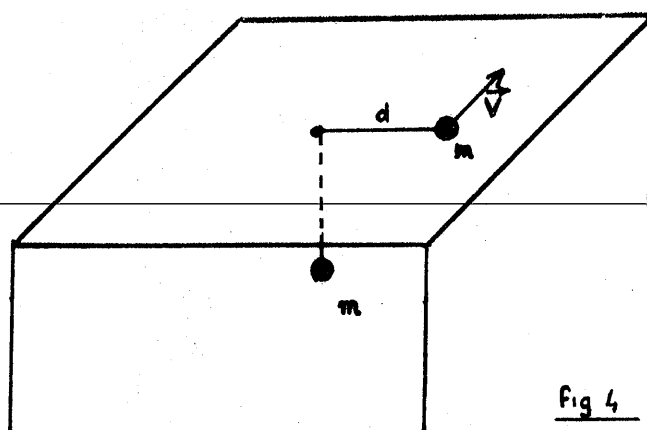
Figure 3 . Schémas de forces pour une masse en mouvement circulaire uniforme dans un repère Galiléen .

d'autres forces justifiant le mouvement ("force d'oscillation, force centrifuge") ces dernières restant parfois seules en piste. La "force centrifuge", dans ce cas, a bien les caractéristiques d'une force de type F_c . Elle a pour fonction d'expliquer une caractéristique du mouvement incompatible avec l'action du ressort : s'il y a mouvement, il y a force, s'il n'y a pas de mouvement, il n'y a pas de force ; il n'y a pas de mouvement le long du ressort, donc il y a une force qui équilibre l'action du ressort (fig 3).

J. Migne (1970), encore, cite ce dialogue :

"Vous prenez une ficelle avec un boulon au bout. Vous le faites tourner. Tout le temps que vous maintenez sa vitesse, il ne retombera pas. Pourquoi ne retombe-t-il pas ? - Il y a d'abord la force centrifuge qui va de l'attache de la ficelle vers le boulon. Et il y a la force centripète qui fait sens contraire".

Cet effet "équilibrant" de la force centrifuge, tant de fois relevé, en cours d'enseignement, s'accompagne d'une perception assez globale du mouvement : puisque la force centrifuge est un effet du mouvement, il faut que celui-ci soit bien établi comme mouvement circulaire pour que celle-là apparaisse. Il est, en particulier, très difficile d'imaginer l' "équilibre" du dispositif dessiné en Figure 4, à partir d'un cliché instantané, même muni d'une schématisation de la vitesse instantanée (telle que $g = \frac{v^2}{d}$), alors



que la donnée d'une trajectoire circulaire complète arrange tout.

Cette relative délocalisation de la force centrifuge rapproche encore celle-ci des forces de type F_c .

Fig 4

On remarque pourtant qu'à l'inverse du cas du mouvement rectiligne oscillant, la vitesse elle-même n'est que rarement associée à une force du type F_c . C'est d'abord l'absence de vitesse le long du rayon dont il faut rendre compte. On sait combien le mouvement circulaire a historiquement bénéficié d'une permanence quasi ontologique. La vitesse tangentielle ?

Elle se conserve, un point c'est tout. Et si un capital de force lui est associé, il n'a aucune raison de se manifester en régime permanent. On vérifie ici encore que ce qui rend vraiment nécessaire une force de type F_c , c'est une incompatibilité apparente entre force d'interaction et mouvement (de sens contraire) ou absence de mouvement (malgré la force).

Ceci dit, lors d'un mouvement circulaire permanent, rien ne permet de distinguer cette force centrifuge de type F_c , qui "tire vers l'extérieur la masse qui tourne" dans un repère fixe, de la force centrifuge F_i , réaction inertielle à un virage du véhicule. Il est inutile de chercher à différencier deux interprétations qui concordent cette fois complètement au niveau de la réponse fournie par l'étudiant "force centrifuge, radiale, $\frac{mv^2}{r}$..." (cf. Tableau 11).

Il faut plutôt remarquer que cette coïncidence ne peut qu'être favorable à l'élimination totale de la question du repère, manifeste en question 2c et confirmée par l'usage courant. Une autre enquête (Partie II) sera l'occasion de revenir sur ce point.

IV. RECAPITULATION

1. Raisonnement local ou non local

Les tableaux 10, 11 et 12 résument l'ensemble de la discussion qui précède. Il s'agit évidemment d'un modèle schématique qui permet de prévoir des tendances d'ensemble réelles, mais non impératives individuellement, ni même forcément majoritaires dans une population donnée. De plus, la présentation cloisonnée des différents types de forces ne doit pas faire oublier que, si ceux-ci ont des caractéristiques observables (par l'enseignant) effectivement bien distinctes, cela n'implique en aucun cas qu'ils aient, pour l'étudiant, des fonctions, ou une nature, radicalement différentes. Il est probable que si le langage courant emploie un seul terme, "Force", c'est pour traduire une seule et même fonction : expliquer le mouvement. Les propriétés de transformation de ces forces par changements de référentiels n'ont pas été systématiquement étudiées ici. Les quelques indications recueillies confirment néanmoins l'impression que l'on se fait bien vite en enseignant : les forces d'interaction, capitalisée, d'inertie ou

centrifuge sont le plus souvent des choses qui existent en elles-mêmes, indépendamment du repère. Analogues par leur fonction explicative comme sans doute par leur propriété d'invariance dans un changement de référentiel, ces types de force se différencient par les aspects qu'elles prennent pour rendre compte de situations, et de questions sur ces situations différentes.

Les conditions de "différence" entre situations ou entre questions font, on l'a vu, une large place à l'existence et au mode de présentation du mouvement ; au travers des types de Forces mis en jeu, et de la manière dont l'énergie est manipulée, il faut bien voir la trace de deux approches différentes du problème : l'une locale ou statique ($\Rightarrow F_{ex}$), qui considère les positions des éléments du système, l'autre, délocalisée ($\Rightarrow F_c$) qui considère l'évolution du système. Plus globalement encore, et donc avec d'autant moins de "preuve", on peut dire que l'une analyse le système, a priori, en lui-même, et l'autre l'analyse a posteriori, décidant ce qu'il doit être pour justifier son évolution.

2. Raisonnement spontané et formalisme mathématique

On vient de lire une interprétation qui fait une bien faible part à l'aspect formel du problème.

Certes, on l'a dit, le modèle mathématique en cause est relativement simple, si bien qu'il est difficile d'y voir l'écueil principal. Et pourtant ? Ne lit-on pas des enchaînements de calculs du style " $\frac{dx}{dt} = 0$ donc $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$ donc $F = \frac{md^2x}{dt^2} = 0$?".

Ne peut-on résumer toute une laborieuse discussion par l'évidence suivante : "Ils confondent vitesse et accélération, $\frac{dx}{dt}$ et $\frac{d^2x}{dt^2}$ " ?

Il n'a jamais été question de nier qu'un maniement à toute épreuve de l'outil mathématique ne soit un puissant garde-fou, propre à éviter, par exemple, des justifications comme celle que l'on vient de citer, propre aussi, pourquoi pas ?, à faire surgir la bonne réponse. Mais on voudrait ici relativiser cet aspect par quelques constatations :

- Rien, dans l'aspect formel du problème, ne justifie que le taux de bonnes réponses et de justifications correctes soit élevé à la question 3

et faible aux autres questions.

- Les résultats en Maîtrise font apparaître au moins autant de réponses fausses (questions 1 et 2) qu'en première année, et ceci sur les mêmes textes. La nature des justifications change (plus descriptives en première année, plus formelles en maîtrise). Les réponses restent les mêmes. Si donc un meilleur maniement de l'outil formel intervient, ce n'est pas forcément pour favoriser la bonne réponse.

- L'implication $\vec{v} = 0 \Rightarrow \vec{\gamma} = 0$ est exacte quand $\vec{v} = 0$ signifie $\vec{v}(t) = 0$ quel que soit t . Dans le cas présent, il y a assimilation entre les conditions $\vec{v}(t_0) = 0$ et $\vec{v}(t) = 0$. On peut remarquer que cette erreur est assez commune (et peut s'observer avec d'autres grandeurs que la vitesse). Par ailleurs, on ne voit jamais apparaître le raisonnement $\vec{v} = \vec{v}_0 \Rightarrow \vec{\gamma} = 0$. L'un des éléments qui peut expliquer ici cette différence entre les cas $\vec{v}(t_0) = 0$ et $\vec{v}(t_0) \neq 0$ est que l'étudiant a une idée a priori du résultat qu'il veut trouver, à savoir : la vitesse est nulle alors l'accélération est nulle. Le calcul ne le choquera pas, car il confirme son idée a priori. On notera que cette assimilation entre vitesse et accélération, ou du moins entre certaines de leurs caractéristiques (signes, sens de variation, valeur nulle ou non), est un effet très largement répandu chez les étudiants.

Mais il n'est pas possible, on vient de le voir, d'en rendre compte par le seul aspect formel des choses. Si donc c'est la physique qui est en cause, qui peut dire maintenant si les élèves confondent force et vitesse parce qu'ils confondent vitesse et accélération, ou si c'est l'inverse qui se produit, ou si même les deux choses sont nécessairement liées ? Les éléments décisifs manquent pour trancher ce débat, à vrai dire assez vain. Même en Maîtrise, où l'aspect formel prend une grande part dans les justifications, on observe des incohérences assez nombreuses (29 % des élèves) entre réponses à ces deux alinéas. La Grande-Bretagne ne fait pas exception (5/14 élèves de 1ère année d'Université, 6/14 élèves de Terminale donnent une réponse différente pour ces deux grandeurs).

- Enfin, il est frappant d'observer la différence de comportement des étudiants confrontés aux alinéas "Force totale" et "Energie potentielle" des questions 2a et 2b. Ce qui est déjà lisible sur les résultats globaux (tableaux 3, 4, 5), se trouve explicité au-delà de toute espérance dans quelques réponses (20 % en MP₁). Voici justement celle qui est citée plus haut, comme apparemment formelle : "Les forces sont différentes, la force de rappel $F = -kx$ étant nulle du fait que, à t_0 , R_3 est à sa position telle que $v = 0$ soit $\frac{dx}{dt} = 0$, donc $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$, donc $-kx = 0$. Or, dans les autres cas, elle n'est pas nulle du fait que l'élongation n'est pas nulle alors que dans ce cas, elle est nulle puisque le ressort est à sa position repos... (puis) ... L'énergie potentielle étant de la forme $\frac{1}{2} kx^2$ (est la même), x étant l'élongation, l'élongation étant la même (!)" (MP₁). Autre cas : "Pour R_3 , elle (la force) est nulle, pour R_2 et R_1 à cet instant, la force totale n'est pas nulle, puisque la masse n'est pas à son élongation maximum... (puis)... L'énergie potentielle dépend de l'élongation du ressort. A l'instant t_0 , l'élongation est la même pour les trois ressorts puisque les extrémités sont à la même altitude" (MP₁).

Plusieurs élèves britanniques (4/14 en 1ère année d'Université) participent des mêmes contradictions explicites : "Total force on each mass: different, because there will be a tension in the springs which will be proportional to the lengths of the springs and these are different in each case at that moment in time... (puis)... Potential energy is the energy of position and at t_0 , each mass is at the same height and therefore the potential energies will be same" (1ère année d'Université). "Total force on each mass: different, because they have different accelerations... and accelerations are different because the masses are at different positions in their period and acceleration is proportional to displacement... (puis) ... Potential energy of each mass, Force exerted by the spring on the ceiling : identical, because the masses have the same displacement".

Ces incohérences ne proviennent sûrement pas de la forme mathématique des expressions de la Force et de l'Energie potentielle en fonction de l'élongation, $F = -kx$, $E_p = \frac{1}{2} kx^2$. Ces expressions sont l'une et l'autre très simples et traduisent sans ambiguïtés la dépendance de ces deux grandeurs à la même variable. Prises comme seul point de départ, elles

conduiraient nécessairement à la même réponse pour Force et Energie potentielle. Mais, à l'évidence, d'autres facteurs interviennent, qui amènent l'étudiant à mettre sous le même symbole x , quelquefois même sous le même terme "élongation" ou "position", des propriétés ou un contenu tout différent .

Le mouvement, on l'a dit, contamine l'évaluation de la Force et, soit par ricochet (puisque $F = -kx$), soit directement, celle de la position, perçue dès lors comme une étape du mouvement ("à l'amplitude maxima, at different positions in their period") plus que comme la donnée d'un point de l'espace. Au contraire l'Energie potentielle donne lieu à une évaluation de la position pour elle-même, relativement extérieure au mouvement (il reste, bien sûr, des justifications telles que : "l'Energie potentielle est, ou n'est pas, à son maximum", mais beaucoup plus rares).

Ces comportements, répétons-le, n'ont pas été analysés en eux-mêmes, mais seulement associés à des formes de questions, des types de situations physiques (Tableaux II et I2). Il s'agit simplement ici, sur l'exemple de cette question 2, d'en mesurer la portée : le formalisme pourtant si simple et si directement contraignant, en apparence, ne suffit pas à expliquer certaines réponses, ni encore moins à en montrer l'incohérence à leurs auteurs. Certaines copies, plusieurs fois raturées, témoignent malgré tout d'un malaise, mais la réponse finale préfère encore l'intuition à la cohérence mathématique.

Devant ces faits, on est contraint d'abandonner l'idée que les difficultés sont ici seulement, ou même d'abord, mathématiques.

DEUXIEME PARTIE

EXPERIENCES COMPLEMENTAIRES

INTRODUCTION

Le modèle que l'on vient de mettre en place repose sur quelques expériences particulièrement focalisées. Le nombre des facteurs, intuitifs ou formels, susceptibles d'intervenir dans les réponses, est réduit autant que possible pour faciliter l'interprétation. Les situations physiques ainsi explorées sont donc aussi en faible nombre, même si certaines, le mouvement d'un projectile notamment, font l'objet d'observations courantes et de commentaires nombreux provenant d'époques et de types de population très variés.

Mais un modèle n'a d'intérêt que dans la mesure où il est prédictif, c'est-à-dire que son champ d'application dépasse les quelques expériences qui ont servi à le construire.

Les expériences complémentaires qui suivent montreront comment le schéma établi en première partie s'applique dans des situations physiques déjà moins dépouillées, plus complexes, mais qui gardent encore les caractéristiques essentielles des premiers questionnaires :

- ce sont des situations construites pour faire apparaître des comportements spontanés bien spécifiques,

- l'outil mathématique nécessaire pour répondre est encore très réduit.

Le pendule simple

(Questionnaire P)

I. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

Comportement spontané étudié : influence de la position et du mouvement particuliers d'un pendule simple (ficelle tendue) sur la constitution du schéma de forces (force résultante, composantes normale et tangentielle).

Texte et population interrogée

60 étudiants de première année (DEUG SSM) ont été interrogés sur le texte suivant : une masse ponctuelle m oscille (schémas 1-2-3) ou tourne (schéma 4) librement dans un plan vertical, au bout d'une ficelle tendue de longueur l , de masse négligeable et dont l'autre extrémité est fixée en un point C. On néglige tous les frottements. Dans chacun des cas schématisés ci-dessous, on a dessiné en pointillé la trajectoire et figuré la vitesse \vec{V} ainsi que l'élongation angulaire α de la masse m .

Représentez sur chacun des schémas ci-dessous la force résultante \vec{F} s'exerçant sur la masse m ainsi que ses composantes normale \vec{F}_N et tangentielle \vec{F}_T . Évaluez ces composantes en fonction des données (m , g , l , α_1 , \vec{V}_1 , α_2 , \vec{V}_2 , α_3 , \vec{V}_3 , α_4 , \vec{V}_4) et justifiez vos réponses.

Il faut remarquer que la réponse exacte utilisée ici deux points de vue :

- la composante tangentielle s'évalue indépendamment de la vitesse du mobile : l'interaction gravitationnelle est un champ de force statique, sa valeur est fonction de la position du mobile ;

- la composante normale ne peut s'évaluer ici qu'à partir du mouvement qu'elle contribue à déterminer : la tension du fil n'est pas liée à une caractéristique macroscopique géométrique, contrairement à celle d'un ressort (exp. q2c).

II. RESULTATS DU QUESTIONNAIRE P

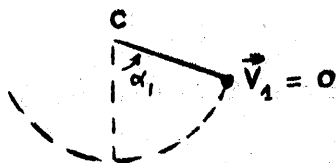
Pour simplifier l'analyse, on fournira les résultats question par question* pour l'ensemble des élèves. On envisagera essentiellement les schémas et les commentaires verbaux. Les calculs, en effet, se présentent bien souvent comme des suites incohérentes de formules et de recettes, où l'on ne sait guère discerner que l'abondance des cosinus et des sinus. Les schémas eux-mêmes feront l'objet d'une étude simplifiée : les composantes normale et tangentielle n'ont pas le même statut dans toutes les réponses. Très souvent absentes en tant que telles, elles font figure parfois de forces "réelles" qui se composent avec les autres forces d'interaction, ailleurs encore elles apparaissent bien comme les projections de la résultante sur la normale et la tangente au mouvement. Quelquefois enfin il est impossible d'en décider. On laisse donc de côté cet aspect des réponses.

En revanche, on retiendra, dans les schémas, les points les moins discutables : .. caractères de la résultante des forces (tableau 13)

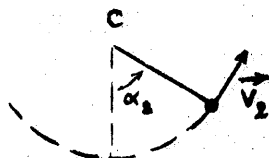
- . mention des 2 forces d'interactions (poids et tension) par des flèches de sens et direction correctes (tableau 14a) ou non (tableau 14b)
- . mention d'une force centrifuge figurant au même titre que les forces d'interaction (tableau 14c).

* On notera ces quatre questions, respectivement P_1 , P_2 , P_3 et P_4 .

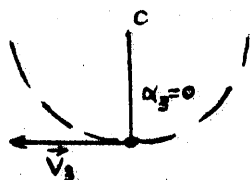
Cas I



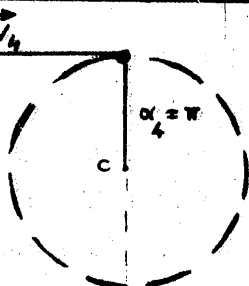
Cas 2



Cas 3



Cas 4



Réponse exacte : quelle que soit la position et le mouvement du pendule simple, une procédure unique conduit au résultat correct :

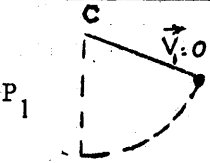
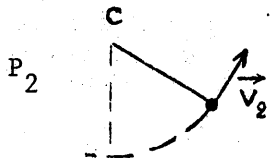

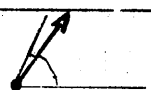
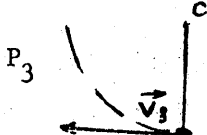
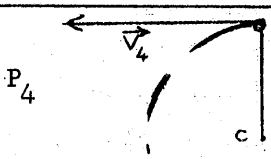



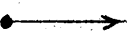
- Composante tangentielle : projection du poids du mobile sur la tangente au mouvement.

- Composante normale : centripète, de module $\frac{m v^2}{l}$
(m , masse du mobile ; l , longueur de la ficelle).

C'est la somme vectorielle de la composante radiale du poids et de la tension du fil.

TABLEAU 13

La force résultante dans les schémas

60 élè- ves	\vec{F} Résultante	P_1 	P_2 
	nulle(d'après le commentaire joint)	12 %	0 %
	dans un angle* 	86 %	48 %
	dans un angle* 	0 %	28 %
	ne sait pas ou pas de réponse	2 %	24 %
		P_3 	P_4 
	nulle(d'après le commentaire joint)	32 %	3 %
		3 %	5 %
		7 %	13 %
	dans un angle* 	26 %	37 %
		0 %	2 %
	ne sait pas ou pas de réponse	32 %	40 %

* Cette catégorie regroupe les réponses telles que la résultante occupe une position quelconque à l'intérieur de l'angle indiqué. Le sommet de l'angle figure la masse mobile.

TABLEAU 14

Les éléments du schéma de forces

60 élè- ves	a : forces d'interaction : poids et tension cor- rectes en sens et direction	b : tension "retournée"	c : force centri- fuge
Ques- tion			
P ₁	78 %	0	0
P ₂	58 %	0	2 %
P ₃	70 %	0	10 %
P ₄	25 %	12 %	18 %

Ces deux tableaux disent l'essentiel. Les quelques autres faits significatifs, plus ponctuels, seront cités dans la discussion au même titre que les commentaires.

III. DISCUSSION1. Mouvement et type de réponse : quelques points remarquables

Un coup d'oeil d'ensemble sur le Tableau 13 confirme l'hypothèse de départ : la démarche adoptée par les étudiants n'a pas, d'une question à l'autre, la cohérence du modèle formel, rappelé plus haut. Un seul élève donne une réponse identique à celle que l'on déduirait de ce modèle. Tous les autres font dépendre directement leurs réponses, autant qu'on puisse juger à travers celles-ci, de la position et surtout du mouvement du mobile. Ainsi :

1.1. Les questions P_1 et P_2 ne diffèrent que par la vitesse du mobile, nulle en P_1 , vers le haut en P_2 . Dans les deux cas, la réponse majoritaire est voisine de la réponse correcte (résultante vers le bas), mais le taux correspondant baisse de 38 % entre P_1 et P_2 . Le taux d'incertitude, parallèlement, monte de 22 %.

1.2. Dans les deux cas, la réponse qui vient ensuite en fréquence se fonde directement sur la vitesse :

a) résultante nulle en P_1 : 12 % soit 7 élèves :

- 4 d'entre eux donnent un schéma correct comportant poids, tension et résultante tangentielle, et ajoutent :

. "comme la vitesse est nulle, la force tangentielle est nulle",

. " $V = 0 \Rightarrow F_T = 0$ et $F_N = 0$ " (2 élèves)

. "en fait, la résultante est nulle $\vec{P} + \vec{T} = 0$

$$F_R = \frac{m \, d \, v_1}{dt} = 0 "$$

- 1 autre dessine tension et poids correctement, et uniquement, puis commente :

. " $V = 0$, $\gamma = 0$, $\vec{P} + \vec{T} = 0$, la boule est à l'équilibre",

- 2 autres enfin équilibrent explicitement leur schéma par une force vers le haut, la "force de rétention de la masse" selon l'un d'eux...

. "... pour que la masse soit à l'équilibre avant de descendre"

. "... puisque la masse est au repos".

b) Résultante vers le haut en P_2 : 28 %. Là encore il faut rajouter, et justifier, l'existence d'une force vers le haut :

. "... la force qui crée la vitesse à m "

. "... la force d'entraînement"

. "... la force d'inertie",

ou plus simplement : " $\vec{V}_2 = \vec{F}_T$ ".

1.3. Les questions P_3 et P_4 font, elles aussi, apparaître des taux considérables d'incertitude (32 %, 40 %), et de réponses fondées directement

sur la vitesse tangentielle (26 %, 37 %), assorties parfois de schémas composant directement poids et vitesse tangentielle (3 %).

2. Incompatibilité force-mouvement et "capital de force" tangentiel

Les points que l'on vient d'analyser sont sans équivoque. On y reconnaît l'intervention d'un "capital de force" lié à la vitesse par une relation du type $F_c = \alpha(V)$. On peut vérifier que ceci se produit d'autant plus fréquemment que le mouvement semble plus "incompatible" avec les forces d'interaction (au sens où l'on n'a pas $\vec{F} \cdot \vec{V} > 0$ ou \vec{F} et $\vec{V} = 0$. voir Tab. 11).

En effet les fréquences d'apparition de ce comportement croissent dans l'ordre P_1 (12 %), P_3 (26 %), P_2 (28 %), P_4 (37 %), tandis que, dans le même ordre, les élèves mentionnent de moins en moins volontiers les forces d'interaction réelles : P_1 (78 %), P_3 (70 %), P_2 (58 %), P_4 (25 %), comme s'ils répugnaient d'autant plus à expliciter une contradiction entre l'existence de ces forces et le mouvement. Ce malaise s'exprime parfois, également, par le refus de la question (ex : P_2) et le besoin de la transformer ("Si V_2 dans l'autre sens..."). Ailleurs encore c'est une question :

"Pourquoi le mobile remonte si $F = 0$?" (P_3).

Il semble bien que l'invention de ce type de "force" colinéaire à la vitesse intervienne pour dissiper le malaise et répondre à la question.

3. Caractéristiques du capital de force

La fonction explicative, causale, du capital de force ressort à l'évidence des citations précédentes.

Les références à l' "entraînement", à l' "inertie", ne manquent pas non plus. Deux autres caractéristiques, relevées à propos d'autres expériences (cf. première partie, Tab. 10) n'apparaissent pratiquement pas ici.

- La "délocalisation" du capital de force ne se lit guère qu'au travers d'allusions à la force exercée "au départ" :

"Pour obtenir que la masse fasse un tour complet, il faut exercer au départ une force $\vec{v}_4 > \vec{v}_3$ " (P_4).

- Quant aux confusions entre force et énergie, on n'en voit pas ici la moindre trace, ce qui n'est guère surprenant dans ce contexte plus que contraignant.

4. La force centrifuge

Toutes les situations proposées présentent un mouvement circulaire. Selon le modèle formel, un tel mouvement traduit l'existence d'une composante de force centripète, non nulle si la vitesse n'est pas nulle, de module $m \frac{v^2}{r}$.

Il semble pourtant que l'aspect "circulaire" du mouvement ne soit que bien peu ressenti :

. L'expression fatidique $\frac{m v^2}{r}$ n'est citée que relativement peu (40 % des élèves seulement la mentionnent à propos d'une question au moins). Encore n'y a-t-il là aucune garantie sur l'usage qui en est fait : cette expression peut aussi bien servir de module à une flèche centrifuge, centripète, et même tangentielle (5 étudiants, en P_4 !), à une force parmi d'autres ou à la résultante, ou encore flotter dans un espace mal défini.

. La question P_3 , particulièrement significative sur ce point, donne lieu à un nombre très faible (3 %) de bonnes réponses. A un tel mouvement, on associe un capital de force tangentiel ou, le plus souvent, un schéma identique à celui de l'équilibre. Cette dernière idée est d'ailleurs extrêmement répandue, jusque chez les enseignants.

On peut voir là le simple reflet de l'habitude scolaire, où les chapîtres "pendule-simple" et "mouvement circulaire" n'ont à peu près rien de commun. Mais la force centrifuge relève plus du raisonnement spontané que des chapîtres des cours de physique : cette hypothèse semble bien confirmée par les résultats obtenus ici. En effet, le comportement des élèves sur ce point (tableau 14) n'est ni quelconque, ni simplement explicable par les effets de l'enseignement :

- La force centrifuge apparaît relativement peu sur l'ensemble du questionnaire (taux maximum : 18 % pour la question P_4), beaucoup moins qu'en question 2c par exemple.

- Sa fréquence d'apparition croît de façon significative dans l'ordre P_1, P_2, P_3, P_4 .

Ces faits peuvent s'interpréter à l'aide de l'une et/ou l'autre des hypothèses suivantes :

. la force centrifuge, force de type F_c liée à l'ensemble du mouvement (cf. I^{ère} partie, II.3.2), apparaît d'autant plus que le dessin suggère un mouvement ample et symétrique par rapport à la position envisagée. Plus le mouvement est établi, plus la force centrifuge intervient. Selon cette hypothèse, l'aspect fragmentaire et local des données cinématiques proposées contribue à évacuer les caractéristiques habituelles du mouvement circulaire

. la force centrifuge, comme le capital de force, intervient d'autant plus qu'elle se révèle utile pour satisfaire au schéma intuitif : si \vec{V} , alors \vec{F} de même sens ; si non \vec{V} , alors non \vec{F} . Dans le cas d'un mouvement circulaire, il n'y a pas de déplacement radial et donc il faut qu'une force, centrifuge en direction, équilibre la (ou les) force(s) d'interaction centripète(s).

Dans ce questionnaire, il n'y a pas de ressort allongé (cf. q.2c) pour matérialiser l'interaction centripète, et dans les questions P_1, P_2, P_3 , on peut toujours compter sur la composante normale du poids pour équilibrer la tension : ceci explique que l'on voit, dans l'ensemble, peu de "forces centrifuges".

En revanche, la question P_4 pose le problème radial : poids et tension sont vers le bas, et pourtant la masse ne tombe pas. La force centrifuge devient nécessaire. Les élèves (12 %) qui "retournent" la tension, en P_4 (tab. 14b), répondent, autrement, au même impératif : "équilibrer" ce qui tire vers le bas. C'est cet impératif, finalement, qui est primordial, plus que l'analyse physique du système. On est encore plus loin des problèmes de référentiel !

IV. RESUME

Cette expérience confirme que bon nombre d'étudiants obéissent à une nécessité intuitive de "compatibilité" entre force et mouvement, et qu'ils sont prêts à fabriquer au besoin la force nécessaire, dans le sens du mouvement si mouvement il y a, opposée aux forces réelles s'il y a "équilibre" (traduire : vitesse instantanée nulle). La notion de force ainsi constituée a bien des caractéristiques du capital de force décrit plus haut (encore que l'aspect énergétique n'y apparaisse pas). La force centrifuge, en particulier, intervient comme une notion à finalité explicative, assurant l'absence de mouvement radial. Elle semble très faiblement associée à l'accélération locale du mouvement, et encore moins à un quelconque changement de référentiel.

Le questionnaire du "glaçon"

(questionnaire G)

I. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

Comportement spontané étudié : les allusions à l' "entraînement", à l' "inertie", sont fréquentes dans des situations à un seul repère (cf. 1ère partie, III). On étudie ici la façon dont les étudiants se comportent devant des situations où un objet évolue à l'intérieur d'un véhicule, accéléré ou non. On veut, en particulier, dans ce test, mettre en évidence l'influence sur les réponses du mouvement du véhicule dans une phase antérieure à l'instant considéré (à l'instant t_0 , on lâche un objet...), et juger par là si l'étudiant raisonne "localement" ou bien fonde ses raisonnements sur des mouvements considérés globalement.

Texte du questionnaire G

"Vous êtes dans un avion qui se déplace toujours horizontalement. Vous posez le glaçon de votre verre de whisky sur une table parfaitement lisse (frottement nul) et horizontale. Vous lâchez ce glaçon à l'instant t_0 , sans lui donner la moindre impulsion. Partira-t-il dans une direction déterminée dans chacun des cas suivants (si oui, laquelle ? Justifiez) :

L'avion...

- 1... avance en ligne droite à vitesse constante
2... avance en ligne droite et accélère

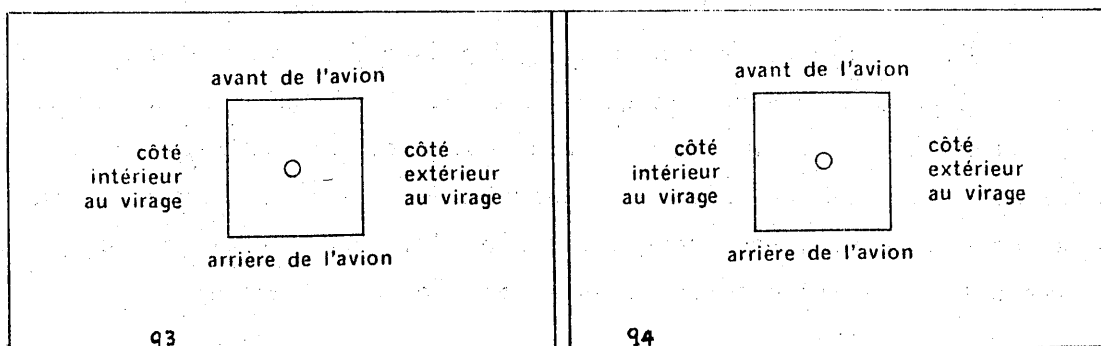
OUI	NON

- 3... exécute un virage d'un mouvement circulaire uniforme
4... amorce à l'instant t_0 un virage, en maintenant constant le module de sa vitesse

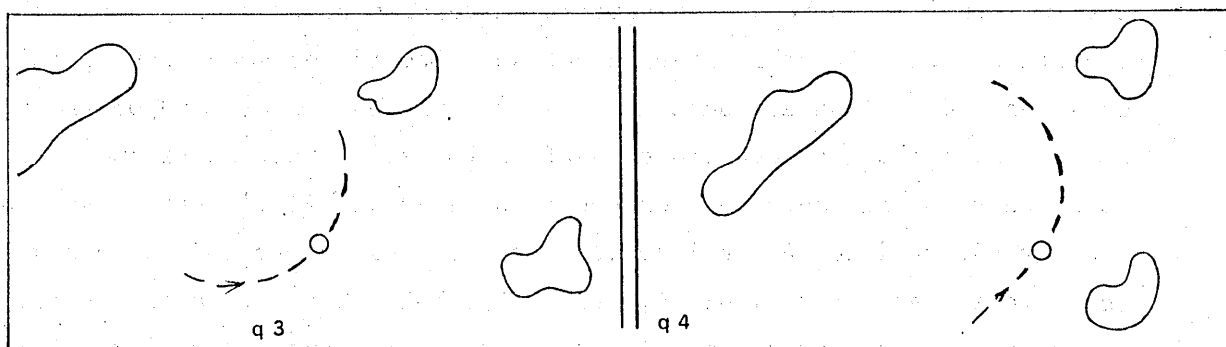
OUI	NON

Dans les deux derniers cas (q.3 et q.4), dessinez la trajectoire du glaçon.

a) sur la table, dans l'avion



b) dans le ciel, comme si l'avion et la table étaient invisibles et que seul le glaçon restait visible (en pointillé, la trajectoire de l'avion).



Deux points ont été soulignés oralement :

1 - le texte n'est pas réaliste : un avion qui tourne s'incline.

Les élèves se sont exprimés très librement sur ce point qui ne semble pas les avoir gênés.

2 - On ne demande qu'une direction de départ et non une trajectoire.

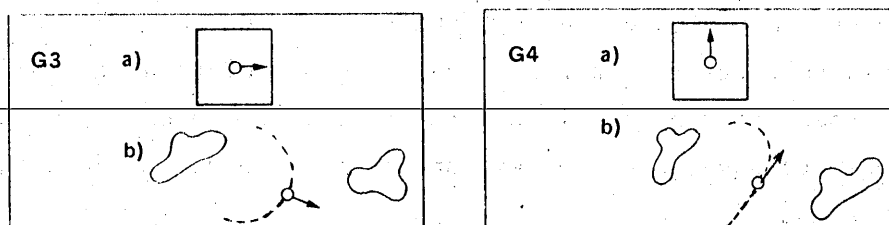
On pourrait considérer, a priori, que ces deux points sont sources de difficultés pour les élèves : là encore ce sont les réponses qui tranchent le débat, puisque aucun de ces aspects de l'énoncé ne peut rendre compte des résultats.

Réponse formelle : toute donnée cinématique antérieure à l'instant t_0 est non pertinente. Puisque, dès l'instant t_0 , l'objet est soumis à une force résultante nulle, celui-ci se déplace alors à vitesse constante (celle qu'il a à l'instant t_0) dans un repère galiléen (ici "le ciel"). Son mouvement relatif à l'intérieur de l'avion a une direction de départ centrifuge. La suite de ce mouvement est plus complexe (la trajectoire est une développante de cercle jusqu'au bord de la table) mais n'est pas demandée.

II. RESULTATS DU QUESTIONNAIRE G

Ce questionnaire a d'abord été présenté à 55 étudiants de MP₁ (1973) sans qu'il leur soit demandé de représenter leur réponse par des schémas. Les deux premières questions G1 et G2 furent correctement traitées par tous les étudiants. Mais les troisième et quatrième questions donnèrent fréquemment lieu au couple de réponses "vers l'extérieur" (cas du virage en cours) et "vers l'avant de la trajectoire" (cas du virage qui s'amorce).

Ce sont ces réponses purement verbales qui ont suggéré la forme définitive du questionnaire figurant ici. Dans cette seconde version, l'étudiant est en principe incité à distinguer deux repères et à lever par ses schémas l'ambiguïté des réponses citées ci-dessus. Les réponses aux deux premières questions sont à nouveau unanimes : entre 90 % et 100 % de réponses correctes à l'ensemble des deux questions, sauf en Formation Permanente où ce taux tombe à 69 %. Les réponses aux questions G3 et G4, à l'inverse, sont d'une très grande variété, à première vue inclassables, et traduisent avant tout une immense perplexité (col. 4, tabl. 15). Mais on s'est laissé guider dans cette analyse par une réponse (relativement rare sous cette forme) à la fois limpide et en accord avec les réponses verbales beaucoup plus simples enregistrées lors de l'expérience préliminaire, réponse que l'on peut résumer par les schémas :

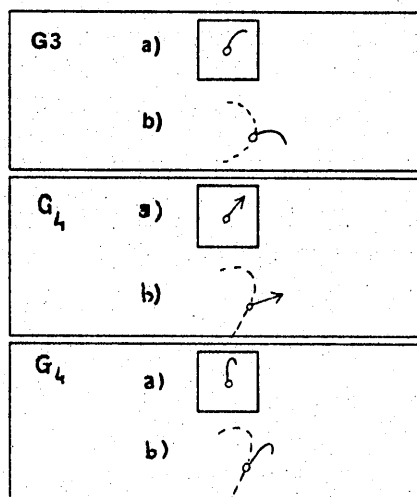


Cette réponse témoigne de deux phénomènes conjugués ici, mais qui ailleurs apparaissent séparément, et dont chacun est massivement représenté :

1 - Pour chacune des questions, la réponse fournie semble directement

transposée d'un repère dans l'autre. Ainsi, ce qui est "radial" l'est dans le ciel comme dans l'avion, de même ce qui est "tangential".

La colonne 2 du tableau 15 concerne tous les cas d'étudiants qui, en réponse à l'une au moins des questions G3 et G4, fournissent un dessin identique dans les deux repères proposés. Sont ici déclarés identiques les schémas a) et b), en réponse à une question donnée G3 ou G4, tels que a) se superpose exactement à b) lorsqu'on aligne la table de a) sur la trajectoire de l'avion en b), glaçon sur glaçon. Tel est le cas dans la réponse ci-dessus, à la fois en G3 et en G4. On peut trouver d'autres couples de schémas identiques, par exemple :



2 - Les questions G3 et G4 sont absolument équivalentes dans la solution formelle. En effet, la vitesse du glaçon à l'instant t_0 et le mouvement ultérieur de l'avion, seuls éléments déterminants du problème, sont identiques dans les deux questions. Pourtant, les étudiants se comportent très souvent différemment vis-à-vis de ces deux questions. Cette disparité de traitement peut prendre plusieurs formes, dont celle qui consiste à savoir répondre à l'une et non à l'autre. Le tableau 15 (col. 3) récapitule tous les cas où les dessins fournis ne sont pas identiques deux à deux, d'une question à l'autre.

TABLEAU 15 - RESULTATS DU TEST G

	1	2	3	4
	N étudiants	même réponse dans repères	réponse en G3 \neq réponse en G4	réponse correcte en G3 et G4
MP 1 73-74	45	33 %	82 %	7 %
MP 1 74-75	34	35 %	94 %	0 %
F.P. 73-74	16	61 %	71 %	0 %
Math Sup 74-75	45	29 %	68 %	15 %
Math Spé 74-75*	35	?	80 %	9 %
MP 1 exp.74-75 **	26	46 %	42 %	8 %

* Résultats communiqués par M. Fauconnet

** groupe ayant subi un enseignement expérimental dont il sera question plus loin.

Quant aux caractéristiques géométriques des schémas fournis, il est difficile d'en faire un classement qui ne soit pas un éparpillement en une poussière de sous-catégories, tant les courbes sont variées, et multiples leurs combinaisons quatre à quatre. Anticipant sur la discussion des résultats, on peut dire que les trajectoires courbes, notamment dans le repère du ciel, sont très difficilement interprétables : rien ne permet de conclure alors qu'une force centrifuge agit à retardement, ou quelles transformations les étudiants ont effectivement utilisées.

Elles sont de plus très difficilement classables. On ne considère donc, dans ce qui suit, que les cas de trajectoires rectilignes, ou de flèches, partant effectivement du dessin du glaçon. Ceci explique que les pourcentages cités (rapportés au nombre total d'étudiants) soient faibles, et donc aussi leurs écarts.

TABLEAU 16 - LES TRAJECTOIRES RECTILIGNES, OU LES FLECHES, SE
REPARTISSENT AINSI :

	DIRECTION TANGENTE A LA TRAJECTOIRE DE L'AVION	DIRECTION NORMALE A LA TRAJECTOIRE DE L'AVION	AUTRE DIRECTION
réponses à G3 et G4 dans le repère de l'avion			
identiques	0 à 9 %	12 (MP 1) à 25 % (Math Sup)	8 %
différentes G3	0 à 10 %	24 (MP 1) à 38 % (Math Sup)	0 à 15 % (MP 1)
G4	6 à 20 % (Math Sup)	0 à 15 % (Math Sup)	0 à 14 % (Math Sup)
réponses à G3 et G4 dans le repère du ciel			
identiques	9 (MP 1) à 58 % (Math Sup)	0 à 7 %	0 à 4 %
différentes G3	0 à 4 %	16 à 18 %	9 à 12 %
G4	12 (F.P.) à 35 % (MP 1)	0 à 2 %	0 à 10 %

Récapitulatif pour tous les groupes interrogés (ceux-ci ne sont mentionnés individuellement que lorsque les écarts dépassent 10 %), compte non tenu du groupe "MP1 expérimental".

Cette analyse simplifiée met en évidence la tendance "radiale" en G3, "tangentielle" en G4, que manifestent déjà la réponse modèle citée plus haut et les commentaires verbaux obtenus en enquête préliminaire. Ces tendances "d'éteignent" d'un repère sur l'autre, comme on vient de le souligner plus haut. Quelques chiffres : en Math. Sup, 20 % des élèves font partir leur glacon, en G3b, selon une direction normale à la trajectoire, dans le repère du ciel (voir rép. modèle G3b).

20 % également, parmi ces élèves, dessinent en G4a une direction de départ vers l'avant sur la table, dans le repère de l'avion (voir la réponse modèle).

III. DISCUSSION DES RESULTATS

Deux faits ressortent principalement de ces résultats :

1. Les questions concernant les mouvements d'entraînement rectilignes sont aisément et correctement résolues. Les dialogues qui ont accompagné ce test, ou ceux qui interviennent en cours d'enseignement, confirment bien ce point : les mouvements inertiels dans un repère accélérés sont clairement associés à l'accélération d' "entraînement" dans le cas de mouvements rectilignes du véhicule, aussi bien lorsque l'accélération est de même sens ou de sens contraire à la vitesse du véhicule.

Ce résultat, que l'on peut peut-être attribuer à la pratique courante des transports motorisés, relève aussi, vraisemblablement d'une autre interprétation : les mouvements rectilignes ne font surgir aucun conflit quant aux sens des deux types de forces susceptibles d'intervenir, le "capital de force" du mobile et sa réaction inertielle au mouvement du véhicule. On a détaillé plus haut (1ère partie, III.2) ce point de vue.

2. Les questions 3 et 4, au contraire, sont l'occasion d'hésitations et d'erreurs nombreuses, quel que soit, une fois encore, le niveau de formation des étudiants. Les conflits évidemment sous-jacents dans ces réponses peuvent être attribués à plusieurs aspects du problème :

2.1. La juxtaposition de deux questions à la fois proches et différentes peut intervenir.

Ce point ne semble pas, en fait, avoir été ressenti comme une difficulté. Seuls 1 ou 2 étudiants dans chaque groupe explicitent leur étonnement : "je ne vois pas de différence entre ces deux questions" et répondent d'ailleurs correctement. La grande majorité (cf. tabl. 15) répond différemment aux deux questions sans que cela semble poser le moindre problème : ces questions, pour eux, sont différentes. Ceci est peut-être le résultat le plus instructif de ce test : c'est bien l'ensemble du mouvement antérieur à t_0 qui détermine la réponse et non un usage local de la relation $\vec{F} = m\vec{\gamma}$, ou d'une autre encore (ex : $\vec{F}_1 = -m\vec{\gamma}_E$).

2.2. Incontestablement l'existence de deux référentiels contribue largement aux difficultés du questionnaire.

Il y a une tendance spontanée à donner un caractère intrinsèque à certains réalités physiques : un mouvement "est radial", ou "tangential"... à "la trajectoire". Cette tendance, notons-le au passage, est peut-être relativement affectée par le niveau de formation : la colonne 2 du tableau 15 affiche 61 % en Formation Permanente (1ère année d'Université pour non-bacheliers) contre 29 % en Math Sup.

La "réalité" que prédit le modèle formel est tout autre : "radial" dans l'avion (ceci est un abus de langage puisque la "trajectoire" de l'avion se réduit à un point dans ce référentiel), le mouvement est, dans le ciel, tangent à la trajectoire. Il y a donc conflit. Mais comment expliquer que l'issue majoritaire à ce conflit soit différente pour les deux questions ?

On pourrait s'en tenir à cette affirmation : en question 3 l'étudiant se place dans l'avion, en question 4, il se place dans le repère du ciel, puis il transpose dans chaque cas son résultat à l'autre référentiel. Mais cette seule interprétation présente une faiblesse : elle suppose que l'étudiant se place nettement dans un repère. Or ce fait est démenti par d'autres expériences déjà citées (Malgrange, J.L., Saltiel, E., Viennot, L., 1975).

2.3. Il semble préférable de retraduire un conflit entre référentiels en un conflit entre type de forces, ou plus vaguement, de "causes" :

- . En question G3 la réponse dominante est radiale. En fait on est souvent témoin, à travers les multiples corrections des étudiants d'un conflit entre l'inertie tangentielle du glaçon, de type F_c , et la force centrifuge, de type F_c et F_i . Mais le fait que la balance penche plus souvent du côté centrifuge peut sans doute s'interpréter par le double statut de cette notion : réaction inertielle F_i relativement instantanée à un virage du véhicule, mais aussi force capitalisée due à l'ensemble du mouvement qui précède.
- . La question G4 est l'occasion d'un conflit du même ordre, plus souvent réglé

cette fois au bénéfice de l'inertie tangentielle. Il n'y a plus coïncidence entre l'effet F_c du mouvement antérieur, exclusivement tangentiel et la force F_i liée au repère mobile. Il faut que le premier de ces termes, F_c , soit bien déterminant pour déteindre sur le second, F_i , et produire un effet inertiel relatif vers l'avant, dans l'avion (20 % en Math Sup), ce qui est contraire à l'expérience la plus banale : tombe-t-on vers l'avant lorsqu'on aborde un virage en voiture sans avoir pu freiner ?

IV. RESUME

Cette expérience met essentiellement en lumière ce fait : les étudiants prennent en compte le mouvement passé du glaçon globalement, comme si le mobile en avait un souvenir autre que sa vitesse instantanée à l'instant t_0 . La notion de capital de force (tangentiel ou centrifuge) n'apparaît pas ici au travers d'une relation directe force-vitesse immédiatement "lisible" dans les réponses. En revanche, elle permet d'interpréter de façon cohérente le caractère non local du raisonnement des étudiants, les conflits que ceux-ci rencontrent (G3, G4) ou ne rencontrent pas (G1, G2), et les solutions qu'ils élaborent.

Conclusion

. Ces deux expériences illustrent, chacune sur des points assez différents, la manière dont on peut utiliser le modèle esquissé plus haut pour interpréter les réactions des étudiants, ou même pour les prévoir qualitativement, puisque ce fut le cas pour l'un et l'autre test.

. On y relève le bon accord des prévisions du modèle avec les faits expérimentaux, et on observe une fois encore, lors de conflits évidents entre intuition et modèle formel, à quel point les raisonnements spontanés imposent leur solution.

. Néanmoins, ces expériences sont aussi l'occasion de mesurer les limites du modèle. Dès que l'on prétend dépasser le niveau de cette constatation : "parfois les étudiants inventent une force de même direction et sens que la vitesse", ce modèle cesse de s'imposer comme le seul possible. Dans l'une et l'autre expérience, l'interprétation peut être contestée, puisque déjà, malgré leur relative simplicité, les questions posées sont susceptibles de faire intervenir de multiples éléments.

. On reprendra ici les arguments avancés plus haut (Introduction, II.3) sur la "validité" du modèle. L'important ici n'est pas tant de décrire les raisonnements des étudiants de manière parfaitement conforme à la "réalité". Il s'agit de trouver, pour représenter ces raisonnements, un langage simple, compact, susceptible d'englober des faits expérimentaux aussi variés que possible, qui permette de les reconnaître ou de les prévoir. Le nombre et la diversité des expériences ainsi interprétées est, à ce titre, un critère essentiel de "validité" du modèle.

TROISIEME PARTIE

RAISONNEMENT SPONTANE EN SITUATION

SCOLAIRE USUELLE

INTRODUCTION

Plusieurs voies se présentent lorsque l'on cherche à mieux comprendre les difficultés, ou les succès, de façon générale les mécanismes de raisonnement des étudiants en physique. La plus immédiate consiste à enseigner, de façon aussi simple et cohérente que possible, puis à évaluer, par les modes de contrôle habituels, quelles sont les questions les mieux comprises et celles qui, au contraire, sont l'occasion de nombreux échecs.

Certes dans la phrase qui précède, trois mots sur quatre peuvent être violemment mis en question : de quelle "simplicité", de quelle "cohérence" s'agit-il ? Qu'appelle-t-on un "échec" ? Quels a priori fondent ce mode de contrôle "habituel", etc...etc...

Il reste que, dans un premier temps, on peut y reconnaître la démarche la plus courante chez les enseignants de physique, et peut-être aussi la plus raisonnable.

Le résultat est cependant bien décevant. Le pessimisme général domine, on conclura souvent que les étudiants n'ont rien compris du tout. Mais il arrive que tel ou tel contrôle donne lieu, au contraire, à un optimisme pour le moins prématuré. Le manque de temps pour une évaluation régulière, les différences entre les types de contrôle, les divergences d'appréciation surtout sont autant d'éléments qui conduisent les enseignants à des conclusions variées.

Mais si l'on veut dépasser le premier niveau d'une constatation globale, par exemple "la dynamique du point est mal comprise", pour chercher à en cerner, sinon les causes, du moins les éléments déterminants, plus restreints, plus précis, alors les divergences s'accroissent encore. Les discussions sur ce point deviennent vite passionnées et laissent souvent chacun sur son opinion, sans doute parce que les faits évoqués y sont en général très complexes et que leur interprétation, dès lors, dépend considérablement du tempérament de celui qui les cite. Les faits précis, contrôlables parce que stables, mettant en jeu aussi peu de variables que possible,

les faits réellement contraignants pour l'interprétation manquent cruellement dans ce type de débat.

On a tenté dans les parties I et II de ce travail, de répondre à cette difficulté. Le parti pris adopté y est la simplification du contexte mathématique, la limitation des difficultés intuitives, dans l'espoir d'en faire apparaître une le plus clairement possible.

Mais ce processus de réduction du problème posé, aussi imparfait soit-il, suffit cependant pour situer l'étudiant hors de son champ habituel de fonctionnement. Peut-on dire alors que les comportements ainsi mis à jour ont une part quelconque dans les réactions observées en situation scolaire classique ?

L'étude que l'on va lire tente de préciser ce point. On a repris des copies déjà corrigées d'un concours de P.C.E.M. à Paris VII (1974) pour y examiner les réponses à l'un des exercices, portant sur la dynamique du point (traité par 416 étudiants). Ces réponses portent la marque de la situation de contrôle : pris par le temps, les étudiants ne répondent pas à toutes les questions, cherchent souvent à répondre à tout prix quelque chose, parfois s'attachent autant à dissimuler leur pensée qu'à exprimer celle-ci.

Ces éléments, qui brouillent l'interprétation, joints à la complexité du problème posé, font de ce matériel un mauvais instrument de recherche. C'est là précisément le genre de contrôle dont les résultats pourront donner lieu aux jugements les plus divers. Et l'on ne prétendra nullement donner la seule interprétation compatible avec les réponses obtenues à cette épreuve. On cherchera plutôt à savoir si les conclusions tirées d'expériences préalables plus spécifiques, trouvent ou non leur confirmation sur ce terrain à la fois broussailleur, pour la recherche, et bien classique dans la pratique quotidienne de l'enseignement. Si tel est le cas, il est probable que ces conclusions, issues d'un aller et retour entre situations scolaires classiques et situations expérimentales du type "piège", représentent bien, sur un domaine restreint, des réactions moyennes d'étudiants intervenant effectivement au cours de leurs études de physique (le terme "représenter" est à prendre au sens : "tout se passe comme si...").

Cette démarche n'exclut pas néanmoins que l'on remarque au passage tel ou tel aspect nouveau des résultats, et que l'on en propose une interprétation qui élargisse au besoin le modèle que l'on met en cause.

Un autre exercice fait en cours de travaux dirigés fournit quelques résultats qui étayent les conclusions de l'étude principale, et seront donnés à la suite.

Concours de PCEM - 1974

I. TEXTE

L'exercice choisi pour faire cette étude, répétons-le, n'a pas été construit à cette fin, mais rédigé par une équipe d'enseignants tout à fait "normale". En voici le texte (on trouvera, en annexe, la trame formelle de la solution) :

"Un ressort sans masse de raideur k est posé verticalement sur une table. Lorsqu'il est libre, sa longueur est l_0 .

On place au-dessus de ce ressort, sans l'attacher, une masse m ($\frac{kl_0}{2} > mg$).

1) L'énergie potentielle du système (masse, ressort, terre) est

$$E_p(z) = \frac{1}{2} K(z-l_0)^2 + mg(z-l_0) \text{ si } z \leq l_0$$

et $E_p(z) = mg(z-l_0) \text{ si } z > l_0$

où z est l'altitude de la masse par rapport à la table. On a choisi le zéro d'énergie potentielle pour la position $z = l_0$.

a) A quelles forces correspondent chacun des termes de E_p ?

b) Pourquoi doit-on distinguer les cas $z \leq l_0$ et $z > l_0$?

c) Tracer la courbe $E_p(z)$

d) Déterminer la position z_0 d'équilibre de la masse posée sur le ressort.

2) On comprime le ressort de façon à amener la masse m à une altitude $z_1 < z_0$ et on abandonne le système à lui-même, sans vitesse initiale.

a) Quelle est l'altitude maximum atteinte par la masse m ?

b) Quelle condition doit satisfaire z_1 pour que la masse m décolle du ressort ?

II. RESULTATS ET DISCUSSION

1. Remarques préliminaires

L'exposé des résultats ne peut être exhaustif : 416 copies d'examen qui abordent six questions, et leur donnent des réponses verbales et/ou algébriques, contiennent une quantité d'information considérable. Il n'est pas possible d'en faire un compte-rendu aussi objectif que celui auquel donnerait lieu, par exemple, un questionnaire à choix multiples. Le critère "réponse juste ou fausse" permet un premier classement mais, d'une part appauvrit considérablement la dite information, d'autre part n'est pas toujours décisif.

D'autres critères seront donc choisis, qui relèvent bien évidemment d'une idée directrice (une étude linguistique en aurait pris d'autres). Les résultats et leur analyse sont donc intimement mêlés dans cette démarche. Pour cette raison, on ne présentera les faits qu'au fur et à mesure de leur utilité dans la discussion, quitte à développer certains points en annexe, et sur un mode plus neutre.

2. Quelques résultats d'ensemble (critère : réponse juste ou fausse)

Situons d'abord par quelques chiffres le niveau de "réussite" de l'ensemble des étudiants, au sens usuel, scolaire, du terme : 416 étudiants abordent l'exercice.

. Q1a et b : 390 et 278 étudiants, respectivement, abordent ces questions. Les réponses, souvent qualitatives, se prêtent mal à une analyse chiffrée, en catégories "juste"-"faux". Deux chiffres pourtant : 47 étudiants calculent correctement les forces par dérivation des énergies potentielles correspondantes. 22 autres font, dans ce calcul (non demandé) une faute de signe.

. Q1c : 277 étudiants abordent cette question.

15 étudiants donnent une courbe d'allure correcte, parmi eux, 6 précisent les abscisses des points remarquables.

19 étudiants donnent une courbe d'allure exacte à ceci près que les pentes au point d'abscisse l_0 sont différentes à gauche et à droite.

. QId : 251 étudiants abordent la question.

94 donnent une réponse juste, pratiquement toujours bien justifiée.

. QIIa : 171 étudiants abordent la question.

29 fournissent un résultat exact z_m .

. QIIb : 125 étudiants abordent la question.

9 parviennent à la condition demandée pour z_1 .

Quatre étudiants ont correctement traité l'ensemble des questions. Cette liste de résultats ne montre guère qu'une chose : l'exercice est mal réussi. Il faut, pour en comprendre les raisons, analyser en détail un certain nombre de points.

3. Force et Energie

Ces deux concepts fondamentaux, l'usage qu'en font les étudiants, du moins, dans cet exercice particulier, seront au centre de toute l'analyse qui suit.

3.1. Confusions force-énergie

Il faut noter à ce propos que la présentation du problème n'est pas indifférente. Le texte décrit une situation physique à la fois en termes évolutifs : "on place une masse sur un ressort..." (elle va s'enfoncer !), et à l'aide d'un champ scalaire statique : l'énergie potentielle. Le rapprochement de ces deux points de vue provoque, on le verra, quelques difficultés.

De plus, la question Ia, qui confronte d'emblée l'étudiant à ces deux aspects du problème, emprunte une formulation quelque peu ambiguë : "à quelles forces correspondent chacun des termes de E_p ?". De quelle correspondance s'agit-il ? Lien mathématique, origine physique des phénomènes ? Faut-il préciser la correspondance ?

A l'imprécision de la question, répond celle de la plupart des 175 réponses obtenues :

- 69 étudiants recalculent (à quelques erreurs de signe près) les forces par dérivation des énergies potentielles et optent donc nettement pour

l'explicitation de la correspondance mathématique.

- Les autres se répartissent des expressions telles que "correspond à", "représente", "énergie due à la force", "... de la force", " $\frac{1}{2} k(z-l_0)^2$: force..." ou " $\frac{1}{2} k (z-l_0)^2$, c'est la force...", qui laissent soupçonner, au-delà des maladroites de rédaction, un certain flou sur la nature même des concepts en cause. Il est difficile de chiffrer l'ambiguïté et de marquer des indices fixes dans ce glissement insensible depuis une correspondance jusqu'à une identité. Mais quelques commentaires témoignent explicitement cette fois, d'un glissement bien achevé :

$$"F = \frac{1}{2} kx^2" \quad , \quad "la force mg (z-l_0)"$$

"si $z < l_0$, l'énergie potentielle sera bien égale à la force de rappel plus la force de pesanteur"

Ces confusions se retrouvent à propos d'autres questions, notamment la dernière (annexe 2, tab. 20, col. 4), au point de laisser parfois l'impression qu'elles concernent deux notions pratiquement interchangeables.

L'assimilation entre Force et Energie peut prendre également une autre forme, rencontrée essentiellement lors de la question sur l'équilibre (ann. 2, tab. 17, col. 9) : une expression homogène, du type $F_1 = F_2$, est considérée comme équivalente à l'expression obtenue en remplaçant les forces par les énergies potentielles correspondantes, $E_{p1} = E_{p2}$. Ainsi :

"Quand la force exercée par le ressort sera égale au propre poids de la masse, c'est-à-dire que les énergies respectives du ressort et du poids s'annuleront".

" E_p du ressort = E_p de la masse : les forces opposées et égales s'équilibrent".

Cette équivalence entre bilans de forces et bilans d'énergies, moins choquante formellement parce qu'elle respecte l'homogénéité, n'est pas seulement une forme atténuée des confusions citées plus haut. Elle en constitue la clé. Mais cette interprétation se fonde sur un autre aspect des réponses.

3.2. Affectation de la Force et de l'Energie

Une question demeure en effet, qui n'est pas explicitée dans ce problème, pas plus d'ailleurs que dans bon nombre d'exercices et d'exposés écrits ou oraux de Mécanique :

Force... exercée sur quoi ? Est-il donc si évident qu'il s'agit en question 1a, de forces exercées sur la masse, ou, plus complètement, de deux types d'interaction entre masse et terre, dont l'une via le ressort ?

La moitié des réponses n'apporte à peu près aucun élément d'information sur ce point, conformément d'ailleurs à l'usage le plus répandu : "Poids, Force de rappel du ressort". Les 137 autres se répartissent ainsi :

12 % disent que la pesanteur et la force de rappel s'exercent, l'une et l'autre, sur la masse.

13 % définissent les deux termes comme des forces s'exerçant sur le ressort.

75 % emploient une formulation bipolaire où se répondent les expressions "Force de la masse, Force du ressort", "Action de la masse, réaction du ressort", "Energie de la masse, Energie du ressort".

Considérée individuellement, chacune de ces dernières formulations est un raccourci de langage tout à fait banal. Mais cette opposition systématique entre deux expressions relatives l'une à la masse, l'autre au ressort n'est pas le simple reflet du hasard.

Ces phrases peuvent s'interpréter par une véritable attribution de la force (ou de l'énergie potentielle) de pesanteur à la masse d'une part, d'élasticité au ressort de l'autre :

"la masse possède une force".

"l'énergie interne du ressort".

"l'énergie de chaque point du ressort".

Il semble que dans chaque cas, Force ou Energie Potentielle soient attribuées à l'objet qui les cause, ou les manifeste. La situation physique présentée, où interviennent deux types d'interaction entre masse et terre, devient une situation d'opposition entre deux objets.

"La force que le ressort oppose à la masse... la force que la masse oppose au ressort..."

"Dans ce cas ($z > l_0$), ce n'est plus la masse qui impose son énergie, mais le ressort qui impose la sienne".

Cette compréhension de la force ou de l'énergie comme propriété d'objet, et la représentation correspondante de la situation en termes de conflit entre ces objets, sont sans doute en grande partie à l'origine des confusions entre force et énergie soulignées plus haut.

Dans un conflit, il y a celui qui gagne et celui qui perd, celui qui impose sa force, son énergie, et l'autre. L'équivalence entre bilan de forces et bilan d'énergies, pourrait bien provenir de cette analyse presque anthropomorphe : si un objet est plus fort qu'un autre, il a aussi plus d'énergie.

Et si les erreurs se limitent le plus souvent à ce premier niveau, préservant ainsi l'homogénéité des égalités entre grandeurs physiques, on conçoit que le pas soit quelquefois franchi jusqu'à l'assimilation complète entre les deux concepts, qui conduit à des écritures inhomogènes du type "force=énergie".

On mesure au passage combien un mode d'analyse spontané assez "naturel", l'usage de raccourcis de langage anodins, la tolérance de certains implicites dans l'exposé formel de la mécanique, ou dans les textes d'exercices, peuvent amener insensiblement certains étudiants à écrire des hérésies "intolérables".

Quoi qu'il en soit, le lecteur comprendra, d'après ce qui précède, que l'on ne puisse pas toujours distinguer Force et Energie dans l'usage qu'en font les étudiants. C'est la raison pour laquelle on s'intéressera dans ce qui suit à deux aspects bien différents des réponses : d'une part on analysera la structure des bilans que les étudiants établissent entre deux termes de Force et/ou d'Energie. On en examinera diverses caractéristiques (sens de l'inégalité, ou présence d'un signe =, localisation des termes...) sans se préoccuper de savoir si l'étudiant manipule en fait un concept de Force, un concept d'Energie, ou un mélange des deux. On emploiera alors le

terme de "Force-Energie" qui ne signifie nullement que l'étudiant fait cet amalgame, mais simplement que l'on ne tient pas compte de ce paramètre. D'autre part, lorsque cela sera possible, on mettra en évidence la présence, ou l'absence systématique, de confusions manifestes entre Force et Energie.

4. Structure des bilans de force-énergie en Partie I. Action et Réaction

On vient d'évoquer la question Ia et les confusions entre Force et Energie qu'elle révèle, ou laisse pressentir, selon les cas. La question Ib n'est guère plus claire : "pourquoi doit-on distinguer les cas $z \leq l_0$ et $z > l_0$?". Le physicien averti qui rédigea ce texte demandait implicitement que l'on justifie les deux formes différentes de l'énergie potentielle du système - ce que font plus ou moins 50 étudiants sur les 278 qui répondent à cette question -. La plupart des autres réponses laissent perplexe. Bien souvent on ignore si l'étudiant paraphrase simplement l'énoncé, ou s'il comprend physiquement le problème : "pour $z > l_0$, l'énergie potentielle du ressort n'intervient plus". Mais 37 étudiants, isolant nettement la question d'un préalable formel plus encombrant que suggestif, répondent aux questions suivantes :

"en quoi ces cas diffèrent-ils ?"

"pourquoi la masse se trouve-t-elle en $z \leq l_0$ ou en $z > l_0$?".

Ces commentaires traduisent des raisonnements directs échappant au cadre formel trop timidement suggéré par l'énoncé. Souvent très explicites, ils fournissent des pistes pour interpréter un marais de formulations imprécises et de données apparemment insignifiantes en elles-mêmes.

On envisagera successivement les cas $z \leq l_0$ et $z > l_0$, bien que les éléments d'information sur ces points soient très imbriqués.

4.1. Compression du ressort, état et transformation ($z \leq l_0$)

La situation présentée, on l'a dit, est souvent retraduite en terme d'opposition entre deux objets. Ce type d'analyse, s'il est cohérent, se prolonge par l'établissement d'un bilan, lequel nécessite un critère. Quelques commentaires (8) se prononcent nettement sur ce point :

" $z < l_0$: la force exercée par la masse est supérieure à celle qu'exerce le ressort puisque celui-ci est comprimé".

Donc la compression du ressort serait un critère décisif, et par suite, également, la position de la masse, puisque pour tout $z \leq l_0$, le ressort est comprimé.

Sur la généralité d'un tel raisonnement, il est difficile de se prononcer. Deux remarques à ce sujet :

- si le rapport de forces est en faveur de la masse, lorsque le ressort est comprimé, on peut admettre qu'il s'inverse pour $z > l_0$. On lit en effet :

" $z < l_0$ Action de la masse $>$ Réaction du ressort.

$z > l_0$ Action de la masse $<$ Réaction du ressort".

"Dans ce cas, $z > l_0$, ce n'est plus la masse qui impose son énergie, mais le ressort".

- Enfin, poussé à son terme, ce raisonnement conduit, pour la position d'équilibre (QId) à la réponse $z_0 = l_0$:

"Il y a équilibre $z_0 = l_0$ lorsque l'énergie ou la force de la masse, et exercée sur le ressort sera égale à la force de rappel de ce ressort".

Cette réponse, $z_0 = l_0$, est observée dans 15 % des cas (ann. 2, tab. 2). Mais elle peut également provenir d'une simple association verbale* :

(longueur au) repos \rightarrow immobilité \rightarrow équilibre. On ne trouvera donc pas d'élément décisif de ce côté-là, ni davantage dans l'étude des courbes $E_p(z)$ à minimum en $z = l_0$ (26 %), dans laquelle trop d'éléments sont susceptibles d'intervenir.

En revanche, l'usage des termes "Action-Réaction" dans ces bilans ne doit pas être considéré comme insignifiant. Le domaine $z < l_0$ est associé à un bilan de forces en faveur de la masse, mais aussi à l'idée que la masse est "active" :

" $z < l_0$: le ressort est comprimé, par conséquent la masse agit dans ce sens".

* Que l'on éviterait en disant "longueur libre".

Un tel commentaire n'a rien pour étonner et prend même une allure de tautologie. Pourtant un bilan du style "Action de la masse > Réaction du ressort" laisse déjà moins indifférent, si l'on a quelque attachement pour la troisième loi de Newton. Si enfin on considère, en question Ia, les quelque 32 (sur 72) formulations bipolaires où les rôles du ressort et de la masse sont dissymétriques, on constate que toutes confèrent un rôle actif à la masse, un rôle réactif au ressort :

"M a, à son actif, une force de pesanteur. Force de réaction du ressort..."

"Poussée de M : mg - Force de réaction du ressort : $k(z-l_0)$ ".

"La masse a une force d'action sur le ressort, le ressort a une force de réaction sur la masse".

"La masse agit une force $mg(z-l_0)$ sur le ressort..."

Les réponses définissant " $k(z-l_0)$ " comme "la force s'exerçant sur le ressort par pression de M" (13 % des cas explicites) constituent le stade ultime de cette consécration de M comme élément actif*.

Les étudiants attribuent ce rôle actif, causal, à la masse parce qu'ils considèrent d'abord l'évolution initiale du système, et non l'état de compression lui-même. Pour s'en convaincre, il suffit d'imaginer le même ressort maintenu comprimé par un fil, la masse étant plus bas que sa position d'équilibre. Que l'on coupe le fil et personne ne parlera, pour le même domaine de compression $z < l_0$, de l'action de la masse. C'est donc l'évolution du système, non son état, qui détermine ces formulations dissymétriques et les bilans explicites qui les accompagnent parfois.

Il faut bien mesurer à ce propos combien la troisième loi de Newton, si accessible lorsqu'elle s'applique à une situation statique, devient difficile à concevoir en situation dynamique. Selon le schéma Newtonien, l' "Action-Réaction" entre Masse et Ressort (ou entre Ressort et sol) est caractérisée uniquement par la longueur du ressort ($F_{12} = -F_{21} = -k(z-l_0)$). Il y a loin, au plan des concepts, entre cette description et la représentation intuitive : Action causale de M - son poids ^{à laquelle,} - s'oppose la Réaction

* Au signe près ceci est conforme, cette fois, à la troisième loi de Newton.

non moins causale du ressort, en un conflit arbitré par l'évolution du système. Dans le schéma formel l'analyse des forces se fait à partir de l'état du système, dans la description intuitive c'est la transformation du système qui est déterminante.

Ces deux points de vue, état et transformation, sont ^{en partie} contradictoires puisqu'un même état peut se présenter au cours de transformations différentes et donc donner lieu à des bilans différents. Mais pour que des contradictions apparaissent, et conduisent l'étudiant à mettre en cause son système d'analyse, il faudrait d'une part que celui-ci envisage explicitement des transformations différentes (compression, détente) pour une même position ($z < l_0$), d'autre part qu'il se soucie d'en donner un modèle où les forces - et les énergies - soient des fonctions de point et non "d'évolution". Rien ne l'y contraint vraiment, dans ces premières questions - pas même la question portant sur l'équilibre, Id -. Le texte, très peu contraignant, autorise l'étudiant à aborder cette question dans le contexte qui lui convient. La position d'équilibre est très volontiers associée à l'idée de l'immobilité, envisagée elle-même le plus souvent indépendamment de la position initiale l_0 , ou de l'évolution intermédiaire du système. Dès lors, le raisonnement intuitif ($V=0 \Rightarrow$ forces antagonistes "égales" ou $F_{\text{Totale}} = 0$) rejoint la définition formelle de l'équilibre, qui est l'une des questions les plus précocement et répétitivement inculquées aux étudiants. Les démarches intuitives et formelles fondées l'une et l'autre cette fois sur l'analyse d'un état d'immobilité, conduisent au même résultat, d'où le taux relativement élevé de réponses correctes (annexe 2, tab. 17). Mais celles-ci ne doivent pas faire illusion : tel élève qui calcule correctement la position d'équilibre emploiera aussi bien, lors d'une autre question, une dynamique intuitive fondée sur l'évolution du système, laquelle ~~pourrait~~ l'amener au résultat $z_0 = l_0$.

4.2. Détente du ressort : position et mouvement de la masse ($z > l_0$)

Les problèmes surgissent véritablement lorsque l'on envisage le cas $z > l_0$. Deux causes antagonistes lors de la compression, la pesanteur et l'élasticité du ressort, agissent ici dans le même sens, vers le bas. De plus le texte ne fournit pas le moindre indice justifiant qu'on envisage

une position d'altitude supérieure à l_0 . D'ailleurs, il ne demande pas non plus que l'on trouve une explication physique.

Toutes les réponses du type : "L'énergie potentielle du ressort n'intervient plus" restent neutres sur ce point. Même les réponses citées plus haut :

" $z < l_0$ Action de M > Réaction du ressort.

$z > l_0$ Action de M < Réaction du ressort"

laissent un doute. Le cas $z > l_0$ pourrait n'être que le miroir du premier, sans donner réellement lieu à une approche spécifique.

Cependant 29 commentaires abordent explicitement la difficulté. Les explications mettent en jeu :

- soit une intervention extérieure statique (4 étudiants)

"la masse est tenue par quelqu'un"

"pour que z soit supérieur à l_0 quand on pose une masse dessus, il faut exercer une force extérieure"

- soit, plus souvent, un "état de mouvement" *. Ce mouvement, dans quelques rares commentaires (3 étudiants), se suffit à lui-même pour expliquer la position $z > l_0$. Mais on trouve, dans les autres cas, des réinterprétations du mouvement, de type causal.

Cette cause se situe :

- ou bien dans le passé du mouvement, et spatialement dans l'autre domaine ($z < l_0$). C'est le ressort comprimé qui se détend (9 et) :

"En comprimant le ressort, le ressort va pouvoir fournir à la masse une force de bas en haut..." ;

- ou bien même dans le présent du mouvement (8 ét.). Elle est alors attribuée explicitement à la masse elle-même, comme en témoignent ces commentaires :

"La masse attire le ressort vers le haut".

"C'est pratiquement la force de la masse qui agit sur le système".

"Ici, $z > l_0$, le corps exercerait une force opposée à son poids".

* Quelques cas sont indécidables. Voir annexe 4.

Dans ces explications causales, le point de départ est le même* : le domaine $z > l_0$ est associé à un mouvement vers le haut, lequel nécessite une cause. La détente du ressort fait fort bien l'affaire. Cependant on observe, dans les derniers commentaires, une sorte de "transfert de cause" aboutissant finalement à rendre la masse responsable de son propre mouvement, comme lors de la compression. Mais si la démarche est analogue, elle est cette fois-ci beaucoup plus révélatrice.

Dans le premier cas ($z \leq l_0$), le rôle causal attribué à la masse ne semble ni particulièrement étonnant, ni spécialement contestable d'un point de vue formel, si l'on n'y regarde pas de trop près. Il y a en effet, dans ce cas, une force d'interaction réelle vers le bas, qui l'emporte effectivement (mais sur une partie seulement du domaine $z < l_0$) sur la force antagoniste.

Rien de tel dans le cas $z > l_0$. La "force de la masse vers le haut" est un concept "illégitime", qui répond chez les étudiants aux besoins d'un système explicatif que le cas $z < l_0$ permet simplement d'entrevoir : un mouvement (cas $z > l_0$), ou l'évolution d'un système (cas de la compression du ressort, $z < l_0$), nécessite une cause agissant dans le sens du phénomène observé. Cette cause peut être une force d'interaction s'exerçant dans le sens voulu (cas $z < l_0$), ou à défaut (cas $z > l_0$) une force d'interaction ayant agi précédemment dans ce sens (celle du "ressort"), et parfois se délocalise et se transforme en cause permanente*. Volontiers attribuée aux objets eux-mêmes (masse ou ressort selon le cas), cette "cause" peut être Force, Energie, ou les deux à la fois. Impliquée dans des expressions du type bilan de forces, cette cause l'emporte (>) sur les éventuelles causes antagonistes. Pour récapituler l'analyse de cette première partie du problème, on est conduit à distinguer dans les réponses des étudiants deux approches différentes :

* Ces deux niveaux d'explications causales, pratiquées parfois simultanément sont à l'origine de contradictions inextricables dans certains commentaires, et souvent de difficultés considérables dans l'interprétation. Voir à ce sujet l'annexe 3.

les positions du système

- Un point de vue "local" consiste à considérer et à reconnaître éventuellement, si l'on pousse cette analyse jusqu'au bout, que force et énergie potentielle de la masse sont des champs statiques, fonctions de point. Selon cette approche, c'est l'état de compression du ressort, la position de la masse, qui sont d'abord considérés. Les étudiants qui interprètent la situation $z > l_0$ par l'intervention d'une force d'interaction extérieure ("la masse est tenue"), ceux pour qui la position d'équilibre est d'abord une position d'immobilité, adoptent ce point de départ nécessairement, puisqu'ils évacuent l'idée de mouvement. Il en est d'autres, sans doute la plupart de ceux qui répondent correctement à la question Ib, qui parviennent à concilier cette approche avec l'existence d'un mouvement.

- Un point de vue "non local" considère avant tout le processus de compression du ressort, le mouvement de la masse, l'évolution du système. Si, dans le formalisme Newtonien, ce point de vue rejoint le premier, il semble qu'il n'en soit pas toujours ainsi chez les étudiants : au processus de compression, au mouvement de la masse vers le haut, sont volontiers associées des explications causales dont on vient de détailler les caractéristiques très peu Newtoniennes.

Il reste à évaluer dans quelle mesure ce dernier type de raisonnement peut déterminer chez les étudiants des réponses spécifiques aux questions plus formelles d'un problème classique. Ne s'agit-il pas en effet de formulations incorrectes certes, mais qui relèvent du langage courant et que l'on abandonne dès que l'on passe au plan formel ? Et les quelques commentaires réellement explicites cités plus haut sont-ils, ou non, significatifs d'un phénomène plus général ?

5. Approches "locales" et "non locales" en partie II

5.1. Forme spécifique des réponses en question IIa et IIb

Les réponses enregistrées en questions IIa et IIb permettent d'éclaircir ces points. Ces deux questions se présentent dans le même contexte : on a précisé cette fois l'opération préalable qui "justifie" les questions : on comprime le ressort (la masse atteint l'altitude $z_1 < z_0$) et on

abandonne le système à lui-même, sans vitesse initiale. La question IIa demande l'altitude maximum atteinte z_m . La question IIb demande la condition sur z_1 pour que la masse décolle (résultats en annexe 2).

Pour cette dernière question, si l'on fait exception des conditions exactes ($z_m > l_0$), qualitatives ($z_1 \ll l_0$) et "divers", il reste 63 réponses (sur 125 : 50 %); toutes ces réponses construisent la condition demandée à partir d'un bilan, exprimé verbalement et/ou algébriquement qui est pratiquement toujours (ann. 2, tab. 20) une inégalité stricte. Ainsi, par exemple :

- col. 2 -

"La force du ressort..... doit être sup.... au poids de la masse".

"La force de compression.. est supérieure.... à mg".

" kz_1 > à mg".

- col. 3 -

" $\frac{1}{2}k(z_1 - l_0)^2$ > à $mg(z_1 - l_0)$ ".

"Il faut que l'énergie ci-

nétique du ressort soit supérieure... à l'énergie potentielle de la masse".

- col. 4 -

"L'énergie du ressort..... > $F = mgh$ ".

"Le ressort doit, grâce à

sa force $\frac{1}{2}kx^2$ vaincre..... le poids de la masse".

"L'énergie du ressort..... doit être supér... à la force exercée par la masse".

"L'énergie cinétique du

ressort doit être suffi-

sante pour équilib-

rer le poids".

On retrouve dans tous ces bilans, un terme de Force-Energie relatif au ressort, qui doit être supérieur (ou, exceptionnellement égal), à un autre terme relatif à la masse. La structure générale de ces bilans rappelle celle des points de départ du calcul de l'équilibre

(tab. 17), le signe $>$ remplaçant simplement le signe $=$ ^{*}. On trouve d'ailleurs des commentaires significatifs à ce propos :

"Iib : il faut rompre l'équilibre".

"Pour qu'elle décolle, il faut que le principe de l'Action et de la Réaction ne soit pas conservé".

Ceci peut s'interpréter ainsi :

- s'il y a décollage, c'est au cours d'un mouvement ascendant,
- s'il y a mouvement vers le haut, il y a force-énergie vers le haut,
- or le poids de la masse tire celle-ci vers le bas,
- il y a donc une autre force-énergie qui agit vers le haut,
- cette force-énergie doit être supérieure à la pesanteur, ou "la vaincre".

Rien que de très naturel, jusqu'ici. En effet, au maximum de compression, il faut effectivement que la force de rappel du ressort soit supérieure en module au poids de la masse pour que celle-ci remonte.

Mais plusieurs questions se posent. D'une part la condition que l'on vient d'énoncer, dont se rapprochent plus ou moins celles des étudiants citées plus haut, est nécessaire pour qu'il y ait décollage, mais pas suffisante. Or ceci n'est jamais spécifié dans ces 63 réponses de type "bilan", ni explicitement, ni implicitement par l'adjonction d'une condition plus stricte. Et si cette condition doit être comprise comme s'appliquant à l'instant du décollage, et non au maximum de compression, elle devient alors trop stricte (si l'on garde aux termes leur sens formel) au point d'être physiquement irréalisable, puisqu'à cet instant la force de rappel du ressort

* C'est la raison pour laquelle on n'a pas classé à part les quelques réponses (4) qui, formellement, sont correctes (compte non tenu, parfois, des signes).

$$\frac{1}{2}k (z_1 - l_0)^2 > mg (l_0 - z_1)$$

En l'absence de toute autre justification, il n'est, pour le moins, pas évident que cette égalité provienne de l'enchaînement :

$$z_m > l_0 \Rightarrow E_{p1}(z_1) > 0 \quad \dots$$

s'annule. Précisions dont on ne voit pas davantage de traces dans les réponses.

D'autre part, les étudiants qui partent d'une condition effectivement nécessaire et suffisante, $z_m > l_0$, ne fournissent jamais auparavant ce type de condition : Force-Energie vers le haut $>$ pesanteur. Un seul de ces étudiants revient à la condition impropre après avoir cité la condition correcte.

Ceci semble indiquer que les conditions insuffisantes ou excessives citées plus haut ne sont pas seulement le début d'un raisonnement inachevé, mais constituent une voie spécifique qui, pour les étudiants, se suffit à elle-même ou, du moins, ne mène à rien d'autre.

Cette hypothèse est étayée par d'autres arguments, qui proviennent de l'analyse des confusions entre Force et Energie, et de celles de la localisation des bilans. Ces deux points seront d'abord exposés, puis interprétés simultanément dans la dernière partie de cette discussion.

Expressions mixtes Force-Energie

On a souligné plus haut les nombreuses confusions entre force et énergie qui conduisent :

- soit à une équivalence entre bilans de force d'une part, d'énergie de l'autre, par exemple :

$$"F_1 = F_2, \frac{1}{2} k (z-l_0)^2 = mg (z-l_0)"$$

- soit à des expressions verbales ou algébriques mélangeant Force et Energie, du genre :

$$"F = \frac{1}{2} kx^2"$$

Or les questions IIa et IIb donnent lieu à des comportements différents sur ce point.

En question IIa :

- les bilans homogènes entre deux termes non nuls (col. 3, 4, 5, 6 du tab. 19) concernent exclusivement, à une exception près, (col. divers), des énergies,

- on ne relève aucune expression mixte (excepté 1 "divers", presque indéchiffrable).

En question IIb :

- les bilans homogènes se répartissent en bilans de forces (36) et bilans d'énergies (15), tout en gardant, on l'a remarqué plus haut, une structure identique,

- on relève plusieurs expressions mixtes (12).

Localisation des bilans

Les tableaux 19 et 20 font, par ailleurs, apparaître une rubrique "localisation" qui précise si les inégalités ou les égalités mettent en relation des termes de force-énergie pris en deux points différents, un même point spécifié, ou un même point non spécifié.

En question IIa, 77 étudiants prennent comme point de départ une égalité entre deux termes non nuls.

- Parmi eux, 65 comparent des termes relatifs l'un à z_1 (maximum de compression), l'autre à z_m (altitude maximum), ou du moins un point désigné par une autre variable,

- 12 autres ne localisent pas leur égalité. Mais 11 d'entre eux donnent une réponse du type $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$ qui se réfère sans doute à l'échange entre énergie cinétique et potentielle, donc implicitement localisée en deux points. Un seul donne un bilan $\frac{1}{2}k(z-l_0)^2 = mg(z-l_0)$ non localisé.

En revanche, en question IIb, où 63 étudiants écrivent une relation entre deux termes non nuls, on observe que :

- 3 envisagent deux positions différentes,
- 22 considèrent une position unique plus ou moins spécifiée (z_1 , z_m , "au décollage", à la fin),
- 38 en restent à une variable unique, non spécifiée.

Les termes Force-Energie font donc l'objet d'une localisation double dans la grande majorité des cas en question IIa, alors qu'en question IIb on n'observe pratiquement que des localisations uniques, diverses, et non spécifiées, pour 63 % d'entre-elles.

Ces deux aspects des réponses - confusions Force-Energie et localisation des bilans - varient, on vient de le voir, de façon significative d'une question à l'autre. Ils ne sont donc pas le fait d'étourderies également réparties par le hasard. Ils confirment que les réponses recueillies en question IIb notamment, mais aussi en question IIa, répondent à un mode spécifique de fonctionnement qu'il conviendrait de mieux cerner. On peut en proposer l'interprétation suivante :

5.2. Force et Energie - Fonctions de point ou de mouvement ?

En première partie, les explications des étudiants, on l'a dit, se partagent ou oscillent entre deux types d'approches : une approche locale, qui se fonde sur les positions pour évaluer les Forces et les Energies, une approche non locale qui considère d'abord le mouvement, ou l'évolution du système, et, dans la recherche d'une cause, construit des bilans de Force-Energie liés au sens de ce mouvement. La présentation du problème, à la fois formelle (E_p du système =) et anecdotique ("on place une masse...") suggère simultanément ces deux approches. On n'est donc pas surpris de les voir représentées l'une et l'autre, un peu au hasard.

Il n'en est pas de même en deuxième partie : la question IIa donne lieu, en majorité, à des raisonnements "locaux", tandis que la question IIb favorise les justifications "non locales".

Ces deux types de raisonnement, tant par leurs caractéristiques que par les conditions dans lesquelles ils interviennent, répondent au modèle résumé au début de cette étude : c'est ce que l'on s'efforcera de montrer maintenant.

Ce modèle en effet subordonne le type de raisonnement mis en jeu par une situation physique, à une question essentielle suivie d'une autre à peine moins importante (tab. 11) : "Le mouvement est-il une donnée immédiatement accessible, qui s'impose comme donnée de départ ?", puis : "Le mouvement est-il "compatible" avec les forces d'interaction ?".

Pour la question IIb, on peut répondre nettement "OUI, le mouvement vers le haut s'impose". "Non, aucune force d'interaction n'explique (n'est

dans le même sens que) le mouvement".*

Le modèle prédit alors (voir tab. 10, 11, 12) l'intervention d'une notion baptisée "Capital de Force" ou force de la masse (voir les commentaires en question Ib) caractérisée par :

- un lien direct avec la vitesse,
- un aspect causal semi-dynamique, semi-énergétique,
- une délocalisation spatio-temporelle.

On constate effectivement que la structure des réponses en question IIb coïncide avec celle que prendraient des formulations en termes de capital de force :

- au mouvement vers le haut est associée une cause (capital de force) vers le haut,
- on rencontre des expressions mixtes (Force-Energie),
- on observe des inégalités entre d'une part un terme lié au début du mouvement (au ressort), mais justifiant l'ensemble de ce mouvement et, d'autre part, un terme lié à l'interaction agissant encore après le décollage. Ces inégalités font l'objet d'une localisation unique, du type bilan de forces, mais diversement ou pas du tout spécifiée. En ceci elles traduisent le caractère à la fois causal (comme la force) et délocalisé (comme l'élan) de la notion de "Capital de Force" en usage ici.

En revanche, le mouvement n'est pas une donnée déterminante en question IIa (on note au passage que la forme de la question importe autant que la situation) : une "altitude maximum", c'est un calcul classique, très fortement associé dans le cas du ressort à l'aspect stationnaire d'un mouvement qui se fait aussi bien dans un sens que dans l'autre, avec échange alterné entre énergie cinétique et énergie potentielle. Il semble que cet échange soit un peu perçu comme celui de deux récipients se vidant sans fin l'un dans l'autre, à l'image de certains gadgets ; situation évolutive, mais où

* Cette "incompatibilité" se manifeste parfois de manière particulièrement radicale :

(415) " $z > l_0$: la force de rappel est nulle puisque le ressort se déplace en sens inverse à celle-ci" (?? du correcteur).

chaque état s'évalue statiquement. Cette remarque, qui est d'abord une impression d'enseignant, est aussi confirmée par des expériences citées plus haut (Partie I, q.IIa et b) : dans un mouvement harmonique notamment, l'énergie potentielle envisagée pour elle-même et non comme élément explicatif du mouvement, est effectivement considérée par les étudiants comme une grandeur statique, fonction de point et non de la vitesse. Ceci peut expliquer les comportements observés ici, en question IIa :

- on ne rencontre pas d'expressions mixtes, mais des bilans comparant presque exclusivement des énergies. Les mélanges Force-Energie liés à l'aspect causal du raisonnement n'apparaissent pas ici,

- les égalités y sont doublement localisées conformément au schéma très souvent explicité de l'échange entre formes d'énergies.

Les raisonnements observés sont donc, dans cette interprétation* essen-

* Cette analyse globale doit comporter quelques nuances. Il y a tout de même quelques bonnes réponses en question IIb, et quelques justifications du type Capital de Force ($V=0 \Rightarrow F_c=0$) en question IIa.

" z_m : jusqu'à ce que la force s'annule".

"L'altitude maximum sera atteinte lorsque l'énergie cinétique, après avoir été maximum, s'annulera, c'est-à-dire quand m ne sera plus soumise qu'à son poids".

Mais ces derniers commentaires, qui relèvent d'un raisonnement intuitif "non local", concernent en question IIa une relativement faible proportion d'étudiants (10/171) alors qu'en question IIb, 63/125 réponses de ce type se répartissent en col. 2,3 et 4 du tab. 20. Les proportions s'inversent pour les réponses du type "raisonnement local" : 96/171 en question IIa (col. 1 à 6, sans préjuger des col. 7,8,11 et 12), 15/125 en question IIb (col.1).

Ajoutons à ces chiffres d'ensemble un petit fait bien significatif : 20 étudiants, partis d'une condition correcte en question IIa donnent une condition impropre (col.2,3 et 4, tab. 20) en question IIb.

Ces étudiants ont adopté un point de vue "local" pour calculer z_m , l'un d'entre eux a même trouvé la condition correcte du décollage ($z_m > l_0$), mais tous sont revenus, pour finir, en question IIb, au raisonnement "non local" intuitif :

"Force (ou énergie) vers le haut > poids (ou énergie potentielle de pesanteur)".

Le cas inverse, raisonnement "local" en Q.IIb ($z_m > l_0$) de type capital de Force en Q.IIa ($F_c=0$) ne se produit jamais.

tiellement du type "local" en Q.IIa (comme dans les réponses exactes à la question Ib), en ce sens que l'énergie y est considérée comme une fonction de point, et plus volontiers du type "non local" en Q.IIb (comme dans certaines réponses en Q.Ib), où force et énergie sont avant tout des éléments explicatifs du mouvement et, de ce fait, se délocalisent et se confondent (Capital de Force).

Cette interprétation rejoint l'analyse faite pour les commentaires en partie I, mais elle en organise plus précisément les éléments :

- L'attribution des grandeurs physiques aux objets, et les mélanges Force-Energie qui en découlent, apparaissent dans des explications de type causal.

- Ces explications sont utilisées préférentiellement lorsque le mouvement d'une masse, l'évolution d'un système s'imposent à l'attention de l'étudiant (point de vue non local).

- Elles prennent la forme d'un bilan "de Force-Energie", de type bilan de forces, mal localisé, et quelquefois formulé à l'aide d'un schéma Action-Réaction très peu Newtonien : la "force-énergie" la plus importante est celle qui agit dans le sens du mouvement.

- En revanche, lorsque le mouvement n'apparaît pas comme une donnée déterminante (point de vue local), les notions de force et d'énergie sont plus souvent manipulées, chacune, conformément à leurs propriétés formelles.

En outre, cette partie II permet d'évaluer l'importance de processus qui ne sont illustrés que sporadiquement, parfois, en partie I du problème, au hasard de quelques commentaires explicites : les prévisions du modèle sont, pour les questions IIa et IIb, conformes aux réponses pour plus de la moitié des étudiants (voir note précédente).

III. REMARQUES SUR L'ANALYSE DES REPONSES

1. Interprétation globale et diagnostic individuel

L'interprétation que l'on vient de lire repose, on l'aura noté, beaucoup plus sur une analyse de la structure et des caractéristiques d'ensemble des réponses que sur l'examen détaillé de chacun d'entre elles.

Considérée isolément, la réponse "pour que la masse décolle, il faut que la force du ressort soit supérieure au poids de la masse" n'a vraiment rien qui vaille la peine de déranger un modèle. Mais l'identité de structure des réponses à cette question IIb (tab. 19), le fait que ces réponses excluent la condition suffisante, la spécificité enfin de leurs caractéristiques, conduisent à mettre en cause cette formulation d'apparence anodine et à en tenter une interprétation plus poussée.

Si l'on accepte cette démarche, on peut aussi revenir sur d'autres commentaires, non soulignés plus haut parce qu'a priori assez peu instructifs. Ainsi :

"la masse reçoit une force opposée à son poids" (Q.Ib)

Cette phrase peut s'interpréter ainsi :

"La masse, au maximum de compression, subit une force opposée à son poids". Mais on peut en proposer une autre traduction, fondée sur les constatations précédentes : "la masse reçoit du ressort une cause de mouvement (capital de Force) qui doit durer ce que dure le mouvement vers le haut".

Rien ne permet cependant de trancher ce cas individuel. Une analyse globale telle que celle-ci peut dégrossir un domaine de difficulté et montrer que les hypothèses faites sur les commentaires ne sont pas seulement de subtils jeux de l'esprit. Mais c'est seulement, sauf cas extrêmes, par un dialogue avec l'étudiant que l'on peut faire un diagnostic individuel précis.

On a tenté à ce propos d'établir des corrélations entre les réponses fournies par un étudiant donné à différentes questions du problème.

Sans succès : tel étudiant qui calcule correctement les forces par dérivation des énergies potentielles, écrit plus loin une expression mixte force-énergie. Tel autre commence par une confusion pour revenir à un comportement correct pour la position d'équilibre : les tendances de type intuitif et le formalisme appris se manifestent tour à tour aléatoirement dans bien des copies.

Ce type de matériel permet donc d'évaluer, par des statistiques globales, l'importance de certains phénomènes, mais se révèle souvent impropre, sauf cas flagrants, à une analyse individualisée.

2. Obstacles intuitifs et difficultés formelles

On vient de souligner les conséquences de raisonnements de type intuitif sur les réponses verbales mais aussi algébriques des étudiants. On peut cependant se demander si d'autres obstacles, d'ordre formel, n'interviennent pas dans cet exercice.

On a noté, par exemple, combien sont rares les courbes $E_p(z)$ correctement construites. L'opération dérivation ne va pas non plus sans quelques dommages pour les signes. Et le calcul de l'altitude maximum, pour peu qu'il soit complètement envisagé et mal pris de surcroît, n'est pas très simple. Voici quelques éléments pour préciser ce point :

- Les réponses classées dans les tableaux 17, 19 et 20 (annexe 2) le sont par type de "point de départ" et non par résultat trouvé. Pour rendre compte de ces réponses par des obstacles formels, il faut donc se situer "en amont" des points de départ et non s'attacher aux nombreuses erreurs de calcul intervenues entre point de départ et résultat.

- Les 15 étudiants qui sont partis d'une condition correcte ($z_m > l_0$) en question IIb n'ont pas nécessairement :

- . calculé la bonne valeur de l'altitude maximum en Q.IIa (7 d'entre eux ne sont pas parvenus au résultat correct),
- . donné une courbe correcte (8 d'entre eux donnent une courbe complètement fausse).

Il est difficile d'affirmer, dès lors, que les autres ont échoué en Q.IIb pour n'avoir pas résolu les questions précédentes.

- Enfin la question Id (position d'équilibre) est l'occasion de 39 réponses $z_0 = l_0$ dont la justification est ^{souvent (56% des cas)} absente ou incohérente (tab. 18, annexe 2). Les erreurs faites dans le calcul ou dans la construction de la courbe ne peuvent donc expliquer à elles seules ce résultat, plus vraisemblablement dû à un a priori intuitif ou une association verbale.

Les faits que l'on vient de citer constituent plus des indications

que des preuves. Ils tendent cependant à montrer que les difficultés formelles ne suffisent pas pour expliquer le comportement des étudiants, qui, en revanche, se trouve étrangement conforme, jusque dans les réponses formelles, aux mécanismes intuitifs proposés plus haut.

CONCLUSION

Il manque surement aux résultats analysés ici le côté spectaculaire obtenu lors d'expériences plus focalisées, mieux contrôlées, dont certaines sont citées plus haut. Et pour qui a entrepris de dépouiller ces 416 copies, la pâture semble bien maigre de prime abord.

A cela, les raisons ne manquent pas, on s'en est expliqué plus haut. Il faut plutôt s'interroger sur les faits qui ressortent précisément du type de "relecture" du matériel initial, que l'on vient de décrire.

On peut d'abord remarquer la distance qui sépare l'attitude du correcteur de celle du chercheur. Ces copies ont été lues avec soin (si l'on peut se permettre d'envisager le contraire !) puisqu'à la relecture attentive on n'y a pas trouvé d'erreur de correction. Pourtant des faits significatifs n'ont pas été remarqués par les enseignants chargés de cette correction. C'est dire combien on peut facilement ignorer ce type de réalités, ou considérer celles-ci comme des subtilités sans conséquence.

Il reste à interpréter ces faits. Là, comme dans toute recherche expérimentale, on l'a déjà noté, le "fait" suppose une idée directrice préalable. Les critères de classement des faits bruts (les mots écrits sur les copies) sont multiples et l'on en a choisi certains.

Les faits présentés sont donc, peut-être, déjà enfermés dans un type d'interprétation. L'important est que ce type d'interprétation s'accorde avec de nombreux autres faits bruts provenant de sources expérimentales diversifiées. Il semble que ce soit ici le cas. L'attribution de grandeurs physiques aux objets eux-mêmes, l'usage implicite d'une relation directe entre Force et Vitesse, la mise en oeuvre d'une dynamique causale délocalisée là où il faudrait ne considérer que des champs statiques, autant d'erreurs qui ne se manifestent pas seulement dans le langage courant ou lors de questions "piège", mais bien aussi dans les problèmes scolaires en usage actuellement.

Il s'agit donc là de phénomènes bien réels et non fabriqués pour les besoins d'une recherche spécialisée. Relativement inapparents en eux-mêmes, dans ce type de contrôle, ces processus permettent pourtant bien d'interpréter ou de prévoir, les tendances d'ensemble des réponses obtenues.

ANNEXE 1P.C.E.M. 1974 :Solution de l'exercice de dynamique - Trame des calculsQ.Ia et b

$$z \leq l_0 : E_{p1} = \frac{1}{2} k(z-l_0)^2 + mg(z-l_0) \quad \text{valeur algébrique de } F_1(z) :$$

$$F_1(z) = \frac{-dE_{p1}}{dz} = -k(z-l_0) - mg$$

- $k(z-l_0)$: valeur algébrique de la force de rappel du ressort

- mg : valeur algébrique du poids de m .

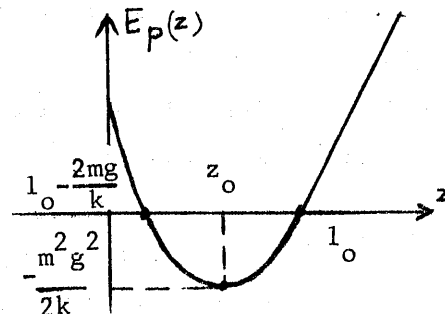
$$z > l_0 : E_{p2} = mg(z-l_0) \quad \text{valeur algébrique de } F_2(z) = -mg$$

La masse, non attachée au ressort, n'est soumise qu'à son poids.

Q.Id : Equilibre :

$$z_0 \text{ telle que } \frac{dE_{p1}}{dz} = 0$$

$$\text{soit } z_0 = l_0 - \frac{mg}{k}$$

Q.Ic : courbeQ.IIa : Altitude maximum :

$$E_{p1}(z_1) = E_p(z_m) \Rightarrow \begin{cases} E_{p1}(z_1) < 0 \Rightarrow z_m = 2z_0 - z_1 \\ E_{p1}(z_1) > 0 \Rightarrow z_m = z_1 + \frac{k}{2mg} (z_1 - l_0)^2 \end{cases}$$

Q.IIb : Condition du décollage : $z_m > l_0$

$$\Rightarrow E_{p1}(z_1) > 0 \quad \text{soit} \quad z_1 < l_0 - \frac{2mg}{k}$$

ANNEXE 2

Résultats en Questions Id, IIa, IIb

Question Id

Cette question, qui porte sur le calcul de la position d'équilibre z_0 , est la mieux réussie de l'exercice. 251 étudiants l'abordent et 94 d'entre eux (37 %) donnent une réponse exacte toujours bien justifiée (à 2 exceptions près). On remarque pourtant que 39 étudiants (15 %) donnent la réponse : $z_0 = l_0$.

On lira, en tableau 17, les justifications fournies, réparties selon les réponses finales (exacte, l_0 , autres). Il faut noter dans ce tableau les justifications multiples, plus symptomatiques que massives, comportant un bilan de forces et un bilan des termes correspondants de l'énergie.

Ces bilans y apparaissent comme équivalents, ainsi que l'explicitent quelques commentaires :

Quand la force exercée par le ressort sera égale au propre poids de la masse, c'est-à-dire que les énergies respectives du ressort et du poids s'annuleront.

L'énergie potentielle de la masse compense l'énergie potentielle du ressort, etc...

Si l'on en croit ces étudiants, les colonnes 1 et 3, 2 et 4 ou 5, 7 et 8 seraient à confondre deux à deux respectivement, dans le tableau 17. Remarquons simplement qu'on y trouve, pour la dernière ligne, des nombres du même ordre.

La réponse l_0 semble pourtant plus spécifiquement liée à des justifications "énergétiques". On peut alors se demander si cette liaison est d'ordre formel, d'autant que l'une des justifications souvent avancées " $E_{p1} = 0$ ", conduit à la réponse l_0 si le calcul est exact, et que l'autre " $\frac{dE_{p1}}{dz} = 0$ " conduit aussi à ce résultat si la courbe est fautive (courbe en cuvette à minimum nul en l_0).

Le tableau 18 répartit les réponses l_0 en fonction du lien établi entre point de départ et résultat. La colonne "courbe fausse" concerne le cas évoqué ci-dessus. Elle regroupe les étudiants dont le calcul est faux ou absent, mais dont la courbe suffit à rendre cohérents point de départ et résultat.

On note que 22 sur 39, soit 56 % des étudiants, qui répondent $z = l_0$ ou bien ne justifient pas complètement cette réponse (23 % non justifié ou point de départ seulement) ou bien la justifient de façon incohérente (33 %, calcul faux).

Notations pour les tableaux 17 et 18 (pages suivantes)

- F_1 et F_2 (E_{p_1} et E_{p_2}) représentent les expressions de la force (respectivement de l'énergie) pour chacun des cas $z \leq l_0$ (F_1, E_{p_1}) et $z > l_0$ (F_2, E_{p_2}).

- Les chiffres entre parenthèses, dans les tableaux 17 et 18, renvoient aux numéros des colonnes "points de départ" du tableau 17.

TABLEAU 17 - Points de départ à la question Id

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Réponse finale	$F_1=0$	$k(z-l_0)=$ = - mg ou $F_{ressort}=$ = - poids	$E_{p_1}=0$	$\frac{1}{2}k(z-l_0)^2 =$ = -mg(z-l ₀)	$\frac{1}{2}k(z-l_0)^2 =$ = +mg(z-l ₀)	E_{p_1} ou $dE_{p_1}/dz = 0$	$F_1=F_2$	$E_{p_1}=E_{p_2}$	multiples	divers
Résultat exact $z_0 =$ $l_0 - mg/k$	26	23				43				2 non justifié
$z_0 = l_0$	39	4	10		2	11	2	4	$\left. \begin{matrix} 1(5,7) \\ 1(5, F_R=0) \end{matrix} \right\} 4$ $\left. \begin{matrix} 1(2,6) \\ 1(2,3) \end{matrix} \right\}$	2 non justifié
autre erreur ou calcul non terminé	118 18	22	13	10	13	12			$\left. \begin{matrix} 4(1,3) \\ 2(1,4) \\ 2(1,5) \\ 1(2,3) \\ 2(2,4) \\ 1(2,5) \\ 1(3,5) \end{matrix} \right\} 13$	12
N	251 44	49	28	10	15	66	2	4	17	16

TABLEAU 18

Liens entre divers points de départ et le résultat $z_0 = l_0$ (en Q.Id)

Point de départ \ Lien	Calcul juste	Calcul faux	Pas de calcul	Courbe fausse	N
(2) $k(z-l_0) = -mg$		3	1		4
(3) $E_{P_1} = 0$	5	3	2		10
(5) $\frac{1}{2}k(z-l_0)^2 = +mg(z-l_0)$		2			2
(6) E_{P_1} mini.; $\frac{dE_{P_1}}{dz} = 0$		3	3	5	11
(7) $F_1 = F_2$	2				2
(8) $E_{P_1} = E_{P_2}$	3	1			4
(9) multiples	1 (5, $F_r=0$)	1 (2,3)	1 (5,7)	1 (2,6)	4
(10) non justifié			2		2
N	11	13	9	6	39

Question IIa

Sur les 171 étudiants qui abordent cette question,

29 parviennent à une réponse correcte. Notons qu'il y avait en fait deux cas possibles :

$$E_{p_1}(z_1) < 0 ; E_{p_1}(z_m) = E_{p_1}(z_1) ; z_m = 2z_0 - z_1$$

ou bien :

$$E_{p_1}(z_1) > 0 ; E_{p_2}(z'_m) = E_{p_1}(z_1) ; z'_m = z_1 + \frac{k}{2mg} (z_1 - l_0)^2$$

Le seul étudiant qui ait envisagé ces deux cas n'a pas terminé son calcul. Ce fait rappelle une fois encore que, plus qu'au résultat du calcul, c'est à la façon dont celui-ci est abordé qu'il faut s'intéresser. Le tableau 19 récapitule les divers points de départ des étudiants dans cette question, quelle que soit leur réponse finale. Les 29 étudiants parvenus à un résultat correct ($z'_m:1$, $z_m:28$) y figurent en colonnes 1 et 3 (respectivement 18 et 11). Les autres ont fourni un calcul incomplet (notamment tous ceux de la colonne 6) et/ou faux. La ligne "localisation" précise, pour les colonnes mentionnant une égalité entre deux termes de Force-Energie, si les deux membres de l'égalité sont à prendre en deux points différents ("localisation double", ex. : $E_{p_1}(z_1) = E_{p_2}(z_m)$) ou bien au même point ("localisation unique") précisé ($E_{p_1}(z_1) = E_{p_2}(z_1)$), ou non. Ceci peut être déterminé d'après l'affectation éventuelle d'indices différents pour la variable z (z_1 , z_m), l'usage de variables différentes (z_1 et h) et les commentaires verbaux.

TABLEAU 19
Points de départ à la question IIa

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
symétrie entre z_1 et z_m par rapport à...	$E_{p_1}(z_1)$ = $E_{p_1}(z_m)$ ou $..l_o$	$\frac{1}{2}k(z_1 - l_o)^2$ = $mg(z - l_o)$	$E_{p_1}(z)$ = $mg(h \text{ ou } z)$	$\frac{1}{2}mv^2 =$ $E_p(z_m)$ ou $mg(h \text{ ou } z)$	E_p max. en z_m	$E_c = 0$ en z_m	$E_p = 0$ en z_m	$F = 0$ en z_m	$z_m =$ l_o		d i v e r s
27	4	34	5	7	31	14	9	7	3	5	25
Localisation											
... double	33	5	7	20	65						
... non précisée	1			11	12						

$N = 171$

Question IIb

Le tableau 20 récapitule les points de départ des réponses à cette question, abordée par 125 étudiants. 15 d'entre eux partent d'une condition correcte et suffisante : $z_m > l_0$ (col. 1, tab.20). On enregistre en outre quelques commentaires purement qualitatifs (on considère l'expression $z_1 \ll l_0$ comme qualitative) qui constituent une réponse incomplète mais manifestent une intuition juste du phénomène physique.

"Il faut que le ressort soit suffisamment comprimé pour que M puisse vaincre la pesanteur".

" $z_1 \ll l_0$: l'énergie qu'il (le ressort) possède alors lui permet de faire décoller M".

"Pour que la masse décolle, il faut que le ressort ait été très comprimé".

Ce type de commentaire, lorsqu'il n'accompagne pas une autre justification plus formelle, figure sous la rubrique $z_1 \ll l_0$ (col. 5, tab.20). Les colonnes 2,3,4 sont définies par des conditions d'inégalités entre deux "forces" (col.2), deux "énergies" (col.3), ou bien une "force" et une "énergie" (col.4), dont l'une est relative au ressort, ou "vers le haut", et l'autre relative à la masse. On entend par "force" soit une expression verbale utilisant ce mot, soit une expression algébrique apparentée (mg , $k(z-l_0)$, kx). De même pour "l'énergie".

La répartition en lignes de localisation, qui est faite pour chacune des colonnes 2, 3 et 4 précise, comme en question IIa, si les deux membres de l'inégalité sont à prendre en deux points différents ("localisation double", ex. : énergie en $z_1 >$ énergie en z_m) ou au même point ("localisation unique") précisé ($E_{p_1}(z_1) > E_{p_2}(z_1)$), ou non.

TABLEAU 20
Points de départ à la question IIb

1	2	3	4	5	6
$z_m > l_0$	<u>Force</u> de compression de détente d'élasticité du ressort, vers le haut, $k(..)$	<u>Energie</u> de compression, etc. $\frac{1}{2} k(..)^2$	<u>Expressions mixtes</u> Energie ou Force vers le haut * Force ou Energie (masse)	$z_1 \ll l_0$	divers
15	36	15	12	21	26
<u>Localisation</u>					
- double	0	2	1	3	
- unique en z_1	10	4		14	
au maximum au décollage à la fin	3	4	1	8	N=125
non précisée	23	5	10	38	
				63	

* Inégalité stricte sauf un cas (= en col.2 et 4, \geq en col.3)

ANNEXE 3

Quelques remarques sur l'analyse des réponses concernant le cas $z > l_0$

On a distingué dans le texte :

- deux approches : l'une statique (a) : "la masse est tenue par quelqu'un" l'autre dynamique (b) : "à vrai dire, je ne sais pas très bien comment il se peut que $l_0 < z$ sauf à partir du moment où le ressort est en mouvement"

- deux types d'explications causales, dans le cas (b) :

b_1 : La cause du mouvement vers le haut est antérieure au passage de M en $z > l_0$, c'est la détente du ressort : "en comprimant le ressort, le ressort va pouvoir fournir à la masse une force de bas en haut"

b_2 : La cause est "présente" au mouvement, elle réside dans la masse elle-même : "la masse attire le ressort vers le haut"

Cependant il se peut :

- que l'on ne puisse, au niveau de l'interprétation, distinguer l'une de l'autre les approches a et b :

" $z > l_0$: il y a une force qui s'exerce de bas en haut, une sorte de force antigravitationnelle".

"Il peut donc ici intervenir une force de traction vers le haut".

"Il y a une autre force qui tire le ressort vers le haut".

" $z > l_0$ implique l'existence d'une autre force dirigée de bas en haut" ;

- que l'étudiant lui-même oscille d'un mode de raisonnement à l'autre, notamment entre b_1 et b_2 :

ainsi un étudiant qui part de la situation $z < l_0$ et établit alors le bilan : " $z < l_0$: Action de M Réaction du ressort" (approche b_2) aura, pour le domaine $z > l_0$ le choix entre deux démarches :

. inverser le bilan :

" $z > l_0$: Action de M \langle Réaction du ressort".

S'il ne s'agit pas là d'une simple symétrisation faite au niveau de l'écriture, ce bilan relève d'une analyse causale du genre b_1 .

. conserver un bilan de même forme :

" $z > l_0$: Action de M $>$ Réaction du ressort",
conformément à l'approche causale b_2 .

Il n'est pas possible de concilier un même type d'analyse causale et l'inversion du bilan en l_0 . D'où quelquefois, des allers et retours inextricables, dont voici un exemple :

" $z > l_0$: la force de réaction interne du ressort est supérieure à la force de la masse..."
puis...

"dans le premier cas $z < l_0$; la masse est ^{supérieure} (sic) inférieure (en force) à la raideur k et à la résistance, donc, du ressort. Dans le deuxième cas $z > l_0$; la masse M est supérieure (en force) à la force d'élasticité du ressort".

QUELQUES RESULTATS COMPLEMENTAIRES

Un exercice de travaux dirigés
(première année de DEUG SSM)

Introduction

Un exercice, voisin en apparence du sujet de l'étude précédente, a été donné par une autre équipe d'enseignants en cours de travaux dirigés, sur l'Energie, à des étudiants de première année. Sans en étudier tous les aspects, là non plus, on soulignera les faits qui rapprochent, ou distinguent, les réponses obtenues lors de ces deux exercices.

I. TEXTE ET SOLUTION DE L'EXERCICE

1. Texte

Deux masses $M_1 = M_2 = m$ sont reliées par un ressort de constante k et de longueur au repos l_0 . L'ensemble repose sur un plan horizontal.

- a) Calculer la longueur l_1 du ressort à l'équilibre
- b) On comprime le ressort jusqu'à la longueur l_2 et on lâche. Calculer l_2 pour que la masse du bas se décolle du plan.



2. Solution

- a) A l'équilibre, la résultante des forces agissant sur M_1 est nulle :

$$-k(l_1 - l_0) - mg = 0 \quad (\text{axe orienté positivement vers le haut})$$

$$l_1 = l_0 - \frac{mg}{k}$$

- b) Pour que la masse M_2 décolle, il faut et il suffit que la résultante des forces exercées sur elle soit non nulle et orientée vers le haut, donc que le ressort ait une longueur L telle que :

$$+k(L - l_0) - mg > 0$$

$$\text{soit } L > l_0 + \frac{mg}{k}$$

Il pourra atteindre la longueur limite $L = l_0 + \frac{mg}{k}$ si on le comprime au moins jusqu'à une longueur l_2 telle que $l_2 + L = 2l_1$ (symétrie du mouvement par rapport à la position d'équilibre).

Donc

$$l_2 = l_0 - \frac{3mg}{k}$$

II. RÉSULTATS ET DISCUSSION

1. Question sur l'équilibre

Les divers points de départs à cette question figurent en tête du tableau 21, sur lequel on lira les taux de réponses correspondants.

TABEAU 21

Points de départ à la question sur l'équilibre

N = 36	Bilan de forces seulement (rép. : $l_0 + \frac{mg}{k}$)	Bilan d'énergies seulement (rép. : $l_0 + 2 \frac{mg}{k}$)	Pas de réponse
	69 %	28 %	3 %

On a également mentionné, en tableau 21, avec les points de départ de calculs, la réponse la plus fréquemment associée. 47 % trouvent le résultat correct. Notons qu'aucun élève n'a donné la réponse $l_1 = l_0$.

Un résumé des résultats obtenus à la même question dans le texte du PCEM (cf. Tab. 17) figure en tableau 22.

TABLEAU 22

Points de départ à la question sur l'équilibre
du texte de PCEM

N = 251

$\frac{dE_{P1}}{dz_1} = 0$	Bilan de forces seulement	Bilan d'énergies seulement	Bilan de forces et bilan équiva- lent d'énergies	divers
26 %	38 %	23 %	6 %	7 %
64 %				

- . 37 % des élèves en PCEM trouvent le résultat correct.
- . 15 % des élèves répondent $z_0 = l_0$ (z_0 est la notation correspondant à l_1).

De ces résultats, il ressort :

1.1. une similitude d'ensemble quant aux points de départ adoptés, si l'on considère que les 26 % de réponses " $\frac{dE_{P1}}{dz} = 0$ " en PCEM sont à attribuer à la forme du texte et traduisent une compréhension correcte de l'équilibre des forces. Un autre point de rapprochement apparaîtra dans les commentaires cités plus loin : là encore il y a "attribution" des grandeurs physiques aux objets, et l'on parle très généralement de "l'Energie du ressort : $\frac{1}{2} k (l_0 - l_1)^2$ " et de celle "de la masse : $mg (l_0 - l_1)$ ".

1.2. quelques points de divergence qui semblent provenir de l'existence de questions antérieures en P.C.E.M.

1.2.1. On ne rencontre pas d'équivalence entre bilans de forces et bilans d'énergies en 1ère année de DEUG SSM, contrairement au PCEM.

. En DEUG SSM, la question sur l'équilibre vient "à froid" et semble réglée de manière formelle. Les points de départ en termes d'énergies reprennent la forme habituelle des bilans dressés dans cette séance qui, rappelons-le, était précisément centrée sur l'Energie. Ils sont tous nettement et doublement localisés, conformément à un schéma d'échange : le travail

du poids $mg (l_0 - l_1)$ est "acquis par le ressort" $\frac{1}{2}k (l_0 - l_1)^2$. Il s'agit ici effectivement d'énergie et non d'une notion mixte (cf. 1ère partie, II.1.5). L'erreur est autre : elle consiste à associer à l'équilibre une énergie cinétique nulle (cf. 1ère partie, II.1.1) : "il n'y a pas d'énergie cinétique puisqu'il n'y a aucune vitesse".

" $E_c = 0$: le système est équilibré".

Energie et force semblent donc manipulées pour elles-mêmes dans une analyse relativement statique, ou locale, du système.

. En PCEM, au contraire, l'étudiant avait dû auparavant analyser la nature des forces, après une description du processus de compression, et à propos d'un domaine spatial ($z > l_0$) suggérant la détente du ressort. L'ensemble de la situation évoquée pouvait apparaître comme une succession d'effets (de mouvements) provenant de causes antagonistes et tour à tour dominantes. On a interprété plus haut (II,4.1) les commentaires des étudiants et les équivalences entre bilan de forces et bilan d'énergies à partir de cette constatation. Sans en être une "preuve", les résultats différents obtenus en l'absence d'un tel contexte (en DEUG SSM) sont compatibles avec cette interprétation.

1.2.2. On n'observe pas en DEUG SSM les réponses "longueur à l'équilibre = l_0 " (longueur au repos), observées en PCEM avec une fréquence non négligeable (15 %) malgré leur invraisemblance apparente. Ce fait souligne à nouveau l'importance des questions préalables en PCEM et montre bien que la réponse $z_0 = l_0$ n'est pas le fait d'erreurs de calcul purement aléatoires, ni même d'une simple association verbale "repos \rightarrow immobilité \rightarrow équilibre". Une autre interprétation proposée plus haut pour cette réponse (cf. II,4.1) attribue celle-ci, comme l'équivalence des bilans de forces ou d'énergies, à l'aspect évolutif et "conflictuel" de la situation évoquée par la première question du texte de PCEM. Cette interprétation reste compatible avec l'absence de telles erreurs en DEUG, où rien ne détermine préalablement l'étudiant dans ce sens.

2. Question sur le décollage de la masse du bas

2.1. Résultats

Les points de départ des étudiants pour cette question figurent en tableau 23.

TABLEAU 23

Points de départ, en DEUG, sur la question du
"décollage"

N = 36

Bilan de Forces	Bilan d'Energies	Bilan de Forces et bilan équiva- lent d'énergies	Pas de réponse
53 %	17 %	5 %	25 %

. Les bilans de forces se répartissent ainsi :

32 % (du total) indiquent que

"F dirigée vers le haut > Poids de M_2 ", ou

"... il faut que la force potentielle du ressort soit supérieure au poids de la masse du bas", ou

"que la force du ressort soit supérieure ou égale à la masse du bas", ou

" $F_r > Mg$ ", " $k(l_1 - l_2) > Mg$ "

21 % (du total) font intervenir les deux masses :

"Pour qu'il y ait décollage, la force de propulsion F du ressort doit être supérieure à la force poids de l'ensemble des deux masses et du ressort",

"... il faut que la résultante des forces > $2 Mg$ ", " $T > 2P$ ".

. Les bilans d'Energies, dont un seul concerne les deux masses, sont tous différents, très confus, et très vaguement ou pas du tout localisés : on mentionne pour M_2 "une vitesse " :

"Si M_2 décolle, elle a une énergie cinétique, une vitesse ", ainsi qu' "une altitude h ", que l'on annule au besoin ensuite.

. La troisième colonne : "bilans de Force et d'Energie équivalents" réunit les caractéristiques des deux premières. Voici les deux réponses qu'elle concerne :

"Pour que M_1 décolle, il faut que la force avec laquelle le ressort se détend soit supérieure au poids de M_1

$$F_R > P$$

$$E_R > E_{P_M}$$

$$\frac{1}{2}kx^2 > mgh \quad (h = 0 \text{ car la masse est au sol au départ})$$

$$\frac{1}{2}k(l_1 - l_2)^2 > 0$$

...

$$l_2(l_2 - l_1) > \frac{1}{2}k l_1^2 \text{ "}$$

"Il faut que le ressort + la masse du haut fournissent une force vers le haut supérieure à la force qui oblige la masse du bas à rester collée au plan.

$$E_R > E_{P_M}$$

$$\frac{1}{2}kx^2 > mg(l_1 - l_2)$$

$$\dots l_2 = l_1 - x, \quad l_1 - \frac{2mg(l_1 - l_2)}{k} \text{ "}$$

(Cette dernière réponse comporte le seul bilan d'énergie localisé entre deux positions (l_1, l_2) obtenu lors de cette question).

. Enfin, on ne trouve dans aucune réponse la succession des étapes indispensables du raisonnement formel.

2.2. Discussion

On va montrer que cette généralité de l'échec traduit l'intervention, à des niveaux divers, de modes d'analyse directs, de type causal, se fondant sur l'évolution du système, plutôt que sur l'usage d'une relation Newtonienne locale qui ne mettrait en jeu que des forces inscrites dans la configuration du système.

2.2.1. Les bilans de forces

- Le point de départ majoritaire (32 %), est identique à celui de la question IIb du PCEM :

"Force vers le haut $>$ poids de M_2 ".

Il est, cette fois, correct puisque le mouvement vers le haut envisagé, le "décollage" de M_2 , se fait sans vitesse initiale. Rien de très étonnant donc, ni de très instructif. Les erreurs s'introduisent plus loin et on y reviendra.

- Le même type de point de départ s'applique parfois (21 %) à l'ensemble des deux masses :

"Force vers le haut $>$ $2 M$ ".

Le raisonnement est identique à celui de la réponse majoritaire, à ceci près que :

- . il suppose également que s'il y a décollage, la masse du haut, M_1 , est également animée d'un mouvement vers le haut ou, au minimum, nul ;
- . il en déduit qu'il faut aussi une force vers le haut pour "l'emporter sur", ou au moins équilibrer, le poids de cette masse M_1 .

Le premier point du raisonnement est exact ici (mais ne le serait pas si l'on retenait la masse M_2 au sol pendant la phase ascendante de M_1 et qu'on lâchait M_2 au début de la descente de M_1).

Le second point relève du même type d'approche intuitive que les bilans les plus fréquents "Force vers le haut $>$ M ". Mais il conduit cette fois à l'erreur, puisqu'au décollage l'accélération et la vitesse de la masse du haut ne sont pas de même sens : cette erreur atteste que l'étudiant a préféré une relation du genre $F = \alpha(V)$ à celle de Newton, alors que les premiers bilans, corrects, laissent subsister le doute.

2.2.2. Quelle "force vers le haut" ?

- Les deux catégories de réponses se rejoignent sur la seconde étape du raisonnement : dans la démarche formelle correcte, il fallait associer cette "force de propulsion" à une longueur donnée du ressort puis se demander à quelle condition une telle longueur pouvait être atteinte. En

d'autres termes, il fallait, dans un premier temps, analyser le décollage localement, en associant force et caractéristique physique du système au même instant (cf. I.2). Seul un étudiant procède ainsi. Les autres (50 % du total) n'envisagent cette longueur maxima qu'au passage, verbalement ou pas du tout, sans lui attribuer de notation ni l'impliquer dans la moindre égalité algébrique. En revanche, presque tous* (47 %) évaluent la force vers le haut à partir de la longueur l_2 du ressort comprimé :

"F est égale, en module, à la force que l'on a exercée sur la masse M, pour comprimer le ressort jusqu'à la longueur l_2 : $F = k(l_1 - l_2)$ ".

Il est possible qu'une telle affirmation repose, sans l'expliciter, sur la symétrie du mouvement et donc sur le fait que les forces agissant sur la masse aux deux points d'amplitude maxima sont "égales et opposées". Mais nulle part on ne voit seulement suggérée cette justification. Il y a, en revanche, plusieurs indices en faveur de l'hypothèse suivante : pour les étudiants, la "force vers le haut" est moins une caractéristique physique instantanée et locale du système que le résultat d'une cause antérieure : la compression du ressort. Cette action de compression introduit dans le ressort un capital de force récupérable sous forme de mouvement vers le haut à la détente. Ce capital s'évalue lorsqu'il a sa valeur maxima, et qu'il se retourne : pour la longueur minima l_2 du ressort. Le retournement du mouvement, en l_2 , suffit à retourner le capital de force, et point n'est besoin de se préoccuper du sens des forces ni de l'instant précis où l'on envisage celles-ci.

A l'appui de cette hypothèse, le fait le plus convaincant est celui que l'on vient de citer : à une exception près, aucun étudiant n'évalue "la force vers le haut" à l'instant même du décollage. Les citations suivantes ne constituent pas des preuves à elles seules, mais elles vont tout à fait dans le même sens :

"On transmet une poussée $F = k(l_2 - l_0) \dots$ ".

"Soit f la force pour comprimer le ressort... $f > Mg$ ".

"Il faut que la force potentielle du ressort soit supérieure au poids

* Une seule exception (3 %) ne localise pas l'évaluation de cette force :

$$F = -k(l - l_0).$$

de la masse du bas $Mg < k(l-l_1)$ ".

"Le ressort poussera M_1 avec une force $F = k(l_2-l_1)$

$F = k(l_2-l) > 2 Mg$ ".

2.2.3. Capital de force, énergie et localisation

Qu'elles soient correctes ou non dans leur point de départ, les réponses mentionnant une force vers le haut (53 %) adoptent donc pratiquement toutes un raisonnement causal où les deux termes du bilan ne concernent pas le même instant, et que l'on peut caractériser par l'intervention d'un capital de force acquis lors de la compression et responsable du décollage : "la force potentielle" du ressort.

Les quelques amalgames (5 %) entre Force et Energie que l'on rencontre lors de cette question (et non dans celle qui concerne l'équilibre) et surtout les bilans d'Energies (17 %) par leur diversité, leurs justifications absentes ou incohérentes, leur localisation imprécise, sont autant d'éléments qui s'interprètent de la même façon : on y retrouve le caractère de grandeur physique mixte (Force-Energie) et délocalisée du Capital de force.

C'est finalement la presque totalité des réponses exprimées où l'on peut reconnaître, à un niveau ou à un autre, l'intervention de ce type de raisonnement, sachant bien, une fois encore, qu'analysée individuellement chacune des erreurs observées pourrait s'interpréter diversement.

Conclusion

Cet exercice est l'occasion d'observer les différences de comportement lors de questions présentant, ou non, des indications quant au mouvement, ou à l'évolution du système (cf. tab. 11).

Une même question (position d'équilibre) est ainsi l'objet de réponses différentes selon le contexte, inexistant en DEUG, beaucoup plus suggestif en PCEM : on observe une analyse locale souvent correcte en DEUG, des types d'erreur fondés sur la prise en compte de l'évolution du système en PCEM.

De même les deux questions de ce même exercice de DEUG suscitent des comportements différents ; à l'analyse locale de la position d'équilibre succèdent les bilans traditionnels associés aux mouvements d'objets pesants vers le haut dans la question sur le décollage. On reconnaît dans ces bilans les caractères d'un raisonnement causal délocalisé en terme de capital de force.

La conclusion de l'étude précédente pourrait être reprise intégralement ici : inapparents en tant que tels du fait de la complexité du problème et des niveaux différents où ils peuvent intervenir, les processus de raisonnement spontanés décrits en première partie rendent bien compte des réponses observées. Ces deux études confirment à la fois la validité du modèle et les raisons pour lesquelles ce type de phénomène s'impose avec si peu d'évidence au correcteur.

Contrairement aux tests proposés en première partie, il n'y a pas ici l'occasion de ces erreurs choquantes, du style " $V = F$ ", ou de ces schémas limpides qu'aucune faute de calcul ne peut expliquer. Les raisonnements intuitifs prennent pour s'exprimer un langage formel déjà complexe et l'origine des erreurs n'en est que mieux masquée.

QUATRIEME PARTIE

CONNAISSANCE DES MODES DE RAISONNEMENT

SPONTANES ET ENSEIGNEMENT

INTRODUCTION

L'ensemble de ce travail, on l'avait annoncé, prend d'abord pour objet l'étudiant lui-même, et non pas l'enseignement qui lui est, ou lui a été, dispensé. Il ne s'agit donc pas d'une étude de pédagogie au sens classique du terme.

Cependant les enquêtes qui précèdent suggèrent un certain nombre de remarques concernant directement l'enseignement. Celles-ci, liées aux résultats que l'on vient d'exposer, n'en sont pas pour autant démontrées : il s'agit de simples pistes de réflexion, dont chacune nécessiterait une étude spécifique, et dont l'ensemble est loin de couvrir tous les aspects du problème.

Ces remarques sont de plusieurs ordres :

. Il y a, dans les résultats résumés ici, quelques éléments d'un bilan de l'enseignement reçu par les étudiants interrogés.

. Les difficultés mises à jour peuvent suggérer quelques pistes de recherche pour des stratégies pédagogiques appropriées.

. Plus généralement, la réaction des étudiants à ce type d'enquête indique l'importance qu'il y a, non seulement pour l'enseignant, mais aussi pour les enseignés, à inventorier eux-mêmes, et à savoir reconnaître, les réactions spontanées les plus fréquentes devant telle ou telle situation physique.

I. QUELQUES ELEMENTS D'UN BILAN DE L'ENSEIGNEMENT RECU

L'impression d'ensemble, au vu des taux d'échec enregistrés, pourrait être que les étudiants interrogés sont tout à fait nuls. Cette conclusion, un peu sommaire, lie implicitement les résultats obtenus ici à une notion globale de "niveau" elle-même à définir.

On peut, du moins, examiner l'éventualité d'une relation entre taux de réponses et un "niveau scolaire" défini par le cadre de l'enseignement : Secondaire ou Universitaire, nième année d'étude.

Les parties I et II de ce travail, en particulier les tableaux 2, 4 et 15, font en effet apparaître les résultats d'étudiants de "niveaux" très différents sur les mêmes textes : les réponses, pour les caractéristiques que l'on en a retenues, ne sont guère, elles, différentes.

Les questions 1b et 2b font même apparaître des résultats plus "mauvais" en Maîtrise qu'en MP1 (Tableaux 2 et 4). Certes ce dernier point ne doit pas retenir excessivement l'attention : les conditions de l'expérience justifient parfaitement, à elles seules, d'importantes fluctuations dans les pourcentages obtenus.

Mais on peut au moins remarquer que les résultats ne sont pas significativement meilleurs avec le niveau scolaire des étudiants interrogés. Entre la première et la troisième année d'Université, entre une Terminale et une classe de Mathématiques Spéciales, les étudiants n'auraient-ils donc que juxtaposé des connaissances mal assimilées à d'autres ?

On observe pourtant - cela n'apparaît guère dans les résultats car il s'agit d'un aspect difficilement chiffrable - que les étudiants de Maîtrise, a fortiori ceux de Mathématiques Spéciales, s'expriment plus généralement et avec plus d'aisance par le canal formel. A propos du questionnaire G, notamment, les étudiants des classes préparatoires font, dans leurs commentaires, une place plus large aux termes "repère", "référentiel", leurs tentatives de calcul sont plus nombreuses et plus cohérentes. Mais les réponses finales présentent absolument les mêmes caractéristiques que celles de leurs camarades moins avancés.

Même les enseignants, à qui l'on présente tel ou tel questionnaire, et qui se risquent à répondre un peu vite, vu la simplicité des situations proposées, tombent également dans le piège. Faudrait-il donc un "niveau"

réellement considérable puisque de bons physiciens peuvent se tromper ? Faut-il leur niveau formel puisqu'eux rétablissent bien vite la bonne réponse ?

Il est difficile de se prononcer sur une question aussi large. Il semble que ce qui manque à l'étudiant n'est pas tant la capacité de manipuler le formalisme lui-même que la confiance dans les résultats qui en découlent.

Une différence essentielle entre l'assistant et l'étudiant qui discutent sur l'un de ces questionnaires, est que l'assistant croit au formalisme qu'il manipule alors que l'étudiant n'y adhère qu'avec réticence si un résultat intuitif contradictoire s'impose à lui (on sait qu'autrement les résultats les plus absurdes ne le choquent pas !).

Il faut rappeler à ce propos les cas, rencontrés plusieurs fois, où la bonne réponse résulte d'un calcul, ou d'un schéma correct, pour être aussitôt contredite par une erreur finale d'origine intuitive.

Ainsi :

- Au concours de P.C.E.M. (1974) un étudiant calcule correctement la position d'équilibre et conclut $z_0 = l_0$.

Un autre amorce sa réponse à la question 11b par une condition exacte, " $z_m \geq l_0$ ", puis revient à la condition intuitive "Force vers le haut $> Mg$ ".

- Au test du pendule, 4 étudiants font un schéma complet et correct en question P₁, mais écrivent à côté : "Comme la vitesse est nulle, la force tangentielle est nulle". "En fait, la résultante est nulle", etc...

- En question 2b (partie I), on a suffisamment souligné les réponses où " kx est différent d'un système à l'autre ... $\frac{1}{2} kx^2$ est le même...".

Des cas aussi flagrants ne sont pas légion. Mais le phénomène est présent dans toutes ces expériences, et fort significatif. (Voir à ce propos I^{ère} partie IV 2, IIIème partie PCEM, III.2).

Si l'on devait, au vu de ces résultats, faire un constat d'échec, ce serait donc celui-ci : les étudiants interrogés n'ont pas, au cours de leurs premières années d'études, acquis suffisamment de confiance dans le formalisme qu'ils manipulent, pour surmonter les difficultés intuitives que font surgir certaines situations (cf. tableau 11).

Quelles sont donc les conditions de la confiance ?

Le "niveau d'étude", on l'a vu, est un facteur qui tarde à devenir déterminant. L'ordre, et le type d'approche, plus "théorique", ou plus "expérimental", adoptés pour l'exposé même des notions, n'est pas non plus, sans doute, un facteur crucial. Ceci n'est, pour l'instant, qu'une opinion personnelle. Mais, à titre d'indication, on peut remarquer que les quelques étudiants britanniques interrogés se sont comportés comme leurs condisciples français, par delà les différentes évidentes de formation et de langue (Partie I, I.4.2.2).

Il faudrait bien, pourtant, d'une façon ou d'une autre, permettre aux étudiants d'un niveau donné d'acquérir dans leur grande majorité l'essentiel des concepts enseignés au moment même de l'enseignement et non seulement rétroactivement*, ne serait-ce que parce que tous ne continuent pas leurs études. Il faudrait, par exemple, qu'après un an de Mécanique, on ait pu faire admettre que la Force est proportionnelle à l'Accélération et non à la Vitesse, et dépasser dans cet accord le stade de la simple répétition verbale ou algébrique d'une formule.

II. QUELQUES SUGGESTIONS POUR L'ENSEIGNEMENT

L'idée centrale des suggestions qui suivent est celle-ci : quels que soient le niveau, l'ordre de présentation ou le type d'approche, il est essentiel que l'enseignement fasse une place explicite aux diffi-

* Cet adverbe fait allusion à la théorie selon laquelle il faudrait enseigner la relativité générale pour bien faire comprendre $\vec{F} = m\vec{\gamma}$.

cultés intuitives et les traite spécifiquement. Le formalisme sera d'autant mieux utilisé, et ses résultats acceptés, que l'on aura souligné auparavant en quoi la cohérence rigoureuse et compacte de ses définitions le sépare de l'intuition.

Dans le domaine particulier envisagé ici, il faut ainsi opposer le caractère local de la relation Newtonnienne aux analyses causales spontanées, qui s'attachent à l'ensemble du mouvement et se promènent sans entraves dans le temps.

. On pourrait, notamment, veiller à ne pas renforcer la tendance naturelle qui consiste à conférer à chaque type de mouvement, assorti de ses expressions analytiques, une existence en soi : le mouvement circulaire, le mouvement uniformément accéléré. Chacun de ces mouvements a des propriétés tout à fait remarquables qu'il faut évidemment mettre en évidence. Mais il ne faudrait pas ainsi créer des catégories complètement disjointes, ni laisser subsister cette idée : "Les mouvements ne sont pas de même nature, les forces sont différentes" (q.2c). Cette idée repose sur une association globale entre force et mouvement, que rien ne vient directement contredire tant qu'on s'en tient à une description analytique du mouvement, par exemple :

$$\begin{aligned}x &= R \cos \omega t \\y &= R \sin \omega t \\ \vec{F} &= - m \omega^2 \vec{R} \dots\end{aligned}$$

L'étude analytique de mouvements continus s'effectuant le long d'une trajectoire donnée est certes indispensable. Mais elle doit laisser place à un point de vue local, confrontant un état du système, un point d'un champ de force avec différents mouvements possibles.

A ce titre, il semble tout à fait indiqué de faire pratiquer aux étudiants des constructions vectorielles point par point, figurant les valeurs successives du vecteur vitesse, et leurs différences, associées à la force locale. Dans le cas du mouvement circulaire, cette opération conduit certains étudiants à une véritable découverte. Il est significatif à ce propos, que R.P. Feynman, dans son cours de Mécanique, présente le calcul numérique pas à pas d'un mouvement harmonique sous le titre

"meaning of the dynamical equations" (Tome I 9-5). Il y a là sûrement plus que le simple souci d'exposer une technique moderne. Le principe pédagogique sous-jacent, qui rejoint les remarques précédentes, mérite quelque attention.

. A titre personnel, on a élaboré quelques documents de travail prévus pour des "travaux dirigés" de première année (la présence d'un assistant est indispensable) et construits sur ce même objectif : faire sentir les implications physiques locales de la relation fondamentale de la dynamique.

Ces textes figurent en annexe.

On s'est efforcé également d'éviter des formulations classiques pourtant, mais qui prêtent à confusion : la "longueur libre" d'un ressort a été préférée à la "longueur au repos", et la "position d'équilibre" volontiers retraduite par une expression en termes de force et non de mouvement, ou, dans le même esprit, représentée avec un vecteur vitesse provocant.

Sur l'efficacité de ces mesures d'inégale importance, on ne se prononcera pas. Les preuves, là encore, manquent, puisque même les quelques résultats obtenus sur cet essai restreint et personnel impliquent également d'autres facteurs, sans doute plus déterminants :

III. REACTIONS DES ETUDIANTS AUX QUESTIONNAIRES PRECEDENTS

On a déjà relevé l'attitude générale des étudiants vis-à-vis de l'enquête : déroutés de prime abord par une règle du jeu inhabituelle, des textes à la fois trop simples et inexplicablement perturbants, ceux-ci sont très vite mobilisés, discutent entre eux avec animation et ne rendent leur copie qu'à regret. Si leur réponse est souvent hermétique, ce n'est pas faute de bonne volonté ni d'esprit de collaboration : c'est parce qu'ils ne parviennent pas à clarifier leur pensée. Ils jouent donc très honnêtement, dans l'ensemble, leur rôle de "matériel expérimental". Mais ils ne s'en tiennent pas là : chaque expérience, une fois les réponses réunies, s'accompagne d'une explication indiquant aux étudiants

la bonne réponse, mais surtout le type de difficulté intuitive explorée, l'erreur habituelle et son mécanisme de fonctionnement. De telles discussions ont été quelquefois l'occasion de déclarations propres à épanouir l'enseignant le plus aigri : "J'en ai plus appris en un quart d'heure...".

On a cherché à voir si cet effet allait au-delà de l'euphorie immédiate. L'essai personnel mentionné plus haut* apporte des éléments sur ce point.

Les caractéristiques de cet essai sont les suivantes :

Il concerne 37 étudiants de MP1.

En tout début d'année, on a introduit la relation fondamentale Newtonnienne, assortie d'une part de procédures de travail figurant en annexe et déjà mentionnées ; d'autre part des questionnaires q2a et q2b exploités comme outils d'enseignement, suivant le schéma suivant :

- passation sans commentaires
- explications de l'enseignant portant sur
 - . la solution
 - . l'erreur habituelle
 - . le mécanisme et les circonstances habituelles de cette erreur.

L'étude analytique des mouvements ne vint qu'ensuite.

Deux résultats précis ont été enregistrés.

L'un concerne les questions 1a et 1b de l'enquête précédente, posés à la suite des premières séances : la nature des justifications change complètement, les forces d'interactions sont prises en compte d'emblée et les réponses correctes sont nombreuses (80 %).

L'autre résultat porte sur le questionnaire "glaçon" posé deux mois plus tard : les résultats des questions G3 et G4 ne sont pas plus massivement "justes", le problème du changement de repère (non traité en

* Cf. tableau 15 : Groupe MP1 expérimental

cours) reste entier et les trajectoires torturées abondent aussi. Mais c'est dans ce groupe que les questions G3 et G4 ont été traitées et reconnues comme identiques par le plus fort pourcentage d'étudiants (tableau 15 dernière ligne) alors que rien dans l'enseignement reçu ne concernait explicitement ce type de problème.

Autre indication : le hasard a fait que dans un groupe interrogé, pour la première fois en principe sur le questionnaire du pendule, se trouve un élève qui avait déjà subi un autre test (q2c, partie I). Cet élève s'est amusé à faire, de façon caricaturale, les erreurs attendues, puis, faussement contrit, à les corriger (non sans oublier, involontairement cette fois, l'accélération centripète en P_2 !).

Cette plaisanterie, comme les résultats de ce début d'enseignement expérimental, confirment l'étroite parenté des difficultés soulevées par ces tests, et soulignent leur intérêt pédagogique. Le fait, pour un étudiant, de démontrer lui-même le mécanisme de son erreur est extrêmement positif et laisse des traces durables. Dans un exercice classique au contraire, la correction est souvent d'une assez faible efficacité. La distance entre l'erreur qui affleure au niveau du résultat et l'attitude de fond qui la détermine est souvent trop grande, et les accessoires trop nombreux. La solution correcte n'apporte alors à l'étudiant qu'une information spécifique pour le problème traité, et se prête mieux à la répétition qu'au transfert.

Si l'on n'a pas ici les arguments d'une large expérimentation pour convaincre, c'est d'abord parce que ces questionnaires sont conçus comme des outils d'investigation et non d'enseignement et qu'on n'entendait pas poursuivre deux lièvres à la fois. C'est aussi parce qu'un enseignant ne sera jamais si bien convaincu de l'efficacité d'un questionnaire qu'après en avoir fait l'essai lui-même.

Plus encore qu'un rapport circonstancié, il faut des expériences que quiconque puisse facilement refaire. Cette opinion personnelle repose sur la réaction très généralement positive des enseignants qui ont bien voulu participer à ce travail.

CONCLUSION

On a tenté, dans ce qui précède, de montrer l'importance des comportements intuitifs dans les réactions des étudiants, et la place qu'on doit leur réserver dans l'enseignement.

On n'entend nullement démontrer par là qu'il faut renoncer à un déroulement de l'enseignement linéaire quant aux notions formelles exposées, ou même faire, parallèlement à cet enseignement, une physique qualitative d'où soit évacuée toute référence formelle. Mais il faut, d'une façon ou d'une autre, mettre en regard d'une relation formellement aussi simple que $\vec{F} = m \vec{\gamma}$, ou $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$, ou toute autre, les jugements proprement intuitifs qu'elles contredisent ou qu'elles confirment.

Le peu que l'on sait sur ces cheminements spontanés du raisonnement doit être approfondi, élargi à d'autres domaines de la physique sinon de la connaissance tout court. Il y a là un champ de recherches très vaste.

Il faut, parallèlement, conduire les étudiants à prendre conscience de leurs réactions intuitives, à les classer, à les reconnaître.

Les connaissances résumées ici, aussi limitées soient-elles, permettent déjà de bien mesurer l'enjeu réel d'une telle approche. Au-delà de l'acquisition des notions elles-mêmes, incontestablement facilitées par l'inventaire préalable des difficultés qu'elles soulèvent, c'est dans la transformation de l'attitude des étudiants qu'il faut voir le résultat essentiel.

Dans cette démarche qui les conduit à reconnaître le caractère morcelé, diversement fructueux et parfois contradictoire de leurs explications intuitives, pour leur substituer un modèle condensé et cohérent, les étudiants adoptent un rôle actif dans le processus d'abstraction. C'est là, vraisemblablement, une condition tout à fait essentielle pour que l'enseignement de la physique prenne toute son efficacité et tout son intérêt, même et surtout à propos des notions les plus simples et s'adressant aux auditoires les moins spécialisés.

ANNEXE - Documents de travail

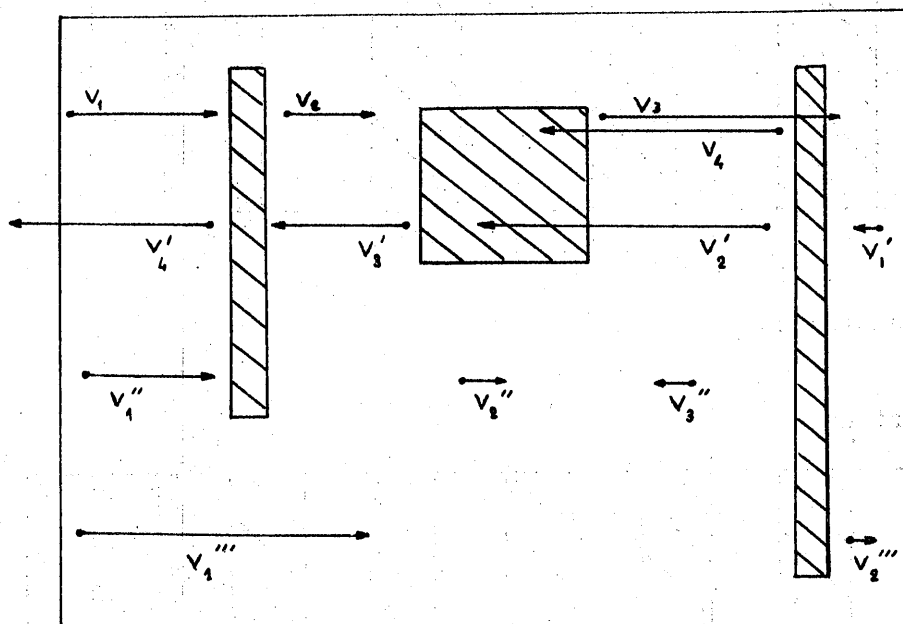
Ces textes ne fournissent que des trames de réflexion pour travaux dirigés. Les étudiants ne sont pas seuls face à ces questionnaires : ils travaillent en groupe et, à tout moment, peuvent demander à l'assistant de préciser telle ou telle question qui leur paraîtrait floue ou trop pauvre.

DOCUMENT 1

A - Un certain nombre de particules de masses inconnues se promènent dans un espace à deux dimensions planté par endroits de champs de force non nuls (zones hachurées). Dans chaque zone, le champ de force est constant et sa direction est la direction commune aux mouvements (à une dimension) de toutes les particules. A l'extérieur des zones hachurées, le champ de force est nul. Sur le dessin, on représente les vitesses successives (indices 1, 2, 3...) de chaque particule (... , ...', ...", ...") entre ces zones.

Sur le passage de chaque particule dans une zone hachurée mettez le sens du champ. Dites s'il y a des erreurs (vitesses incompatibles avec un champ de sens constant dans une même zone hachurée).

Imaginez un dispositif physique réalisant approximativement cette situation.

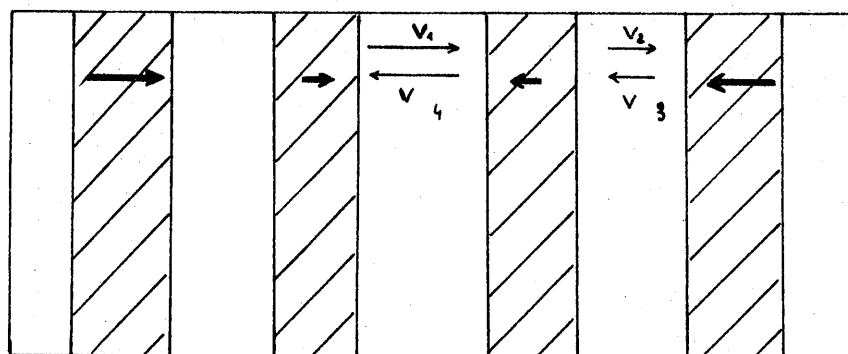


B - Même principe, mais cette fois on donne les valeurs des champs de force (toujours constants dans chaque zone hachurée) et les premières valeurs de vitesse (hors zone hachurée) d'une particule lancée sur ce billard très spécial. Représentez les huit valeurs suivantes de la vitesse (toujours hors zone) et ajoutez "etc...". Où la vitesse s'annule-t-elle ? La force est-elle nulle en ces points ?

- Le champ de forces que l'on vient de décrire schématiquement, et le mouvement qui en résulte pour la particule, rappellent par certaines de leurs caractéristiques, des systèmes mécaniques simples. Dessinez parallèlement au premier "billard" un tel système et vérifiez l'analogie (positions de vitesse nulle, points de force nulle).

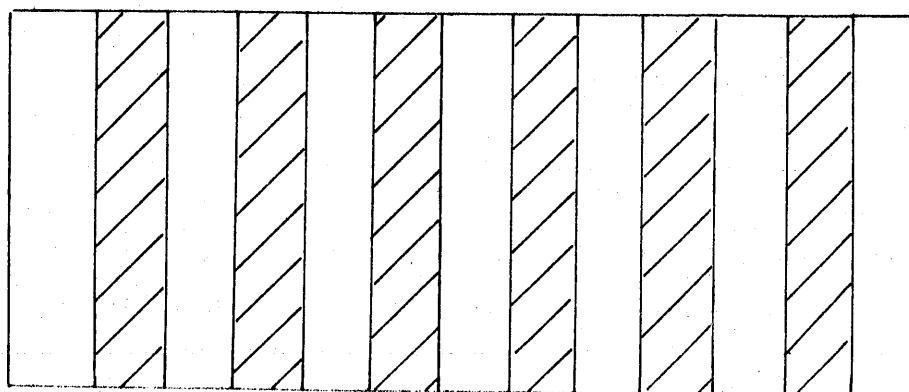
- Qu'est-ce qu'une "position d'équilibre". Positions d'équilibre du premier billard ?

- Affinez la représentation du système mécanique ci-dessus par un billard à 6 bandes.



. Système analogue :

. Modèle affiné



DOCUMENT 2

Trois balles de même masse m ont un mouvement de chute libre que l'on photographie à des instants (numérotés 1, 2, ...) régulièrement espacés dans le temps.

Les trajectoires ont un point commun (n° 6). On a tracé autour de ce point un cadre que l'on a agrandi deux fois pour plus de commodité.

. A partir de cette photo agrandie, trouver une grandeur dont la valeur soit la même pour les trois mouvements.

La définir - symboliquement avec des lettres que vous mentionnerez

également sur la figure

- en Français (si vous ne comprenez rien, appelez l'assistant).

. Précisez, après vérification sur la figure agrandie, si les grandeurs suivantes dépendent ou non

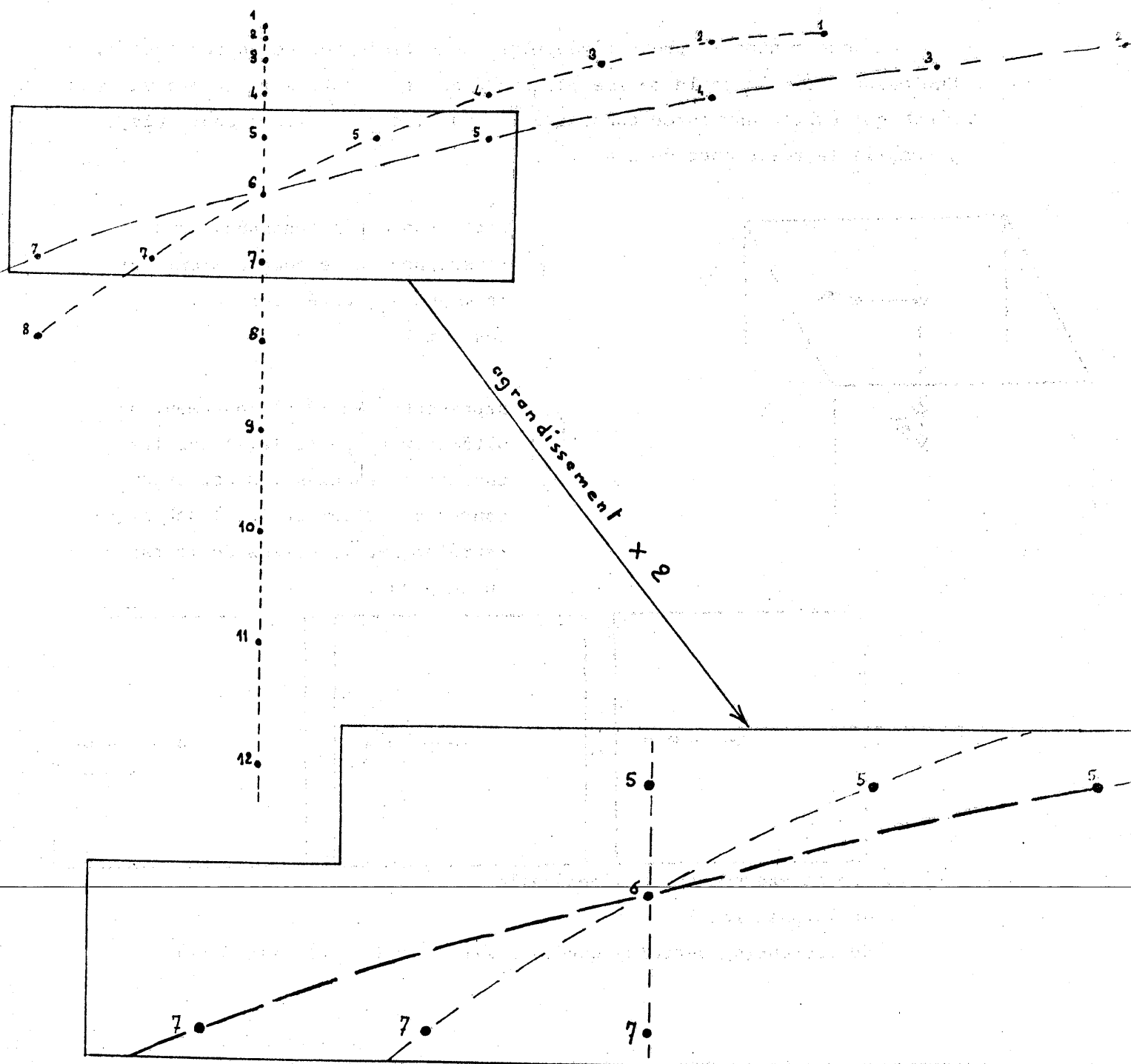
	de la trajectoire		du sens du parcours sur une trajectoire donnée	
	OUI	NON	OUI	NON
Vitesse linéaire au point n°6				
Direction de la vitesse au point 6				
Dérivée $\frac{dv}{dt}$ de la vitesse linéaire au point 6				
Composante horizontale V_x de la vitesse au point 6				
Composante verticale V_y de la vitesse au point n°6				
Leurs dérivées respectives par rapport au temps $\frac{dV_x}{dt}$ (au point 6)				
$\frac{dV_y}{dt}$ (au point 6)				

. Quelle propriété physique est associée à vos réponses concernant $\frac{dV_x}{dt}$ et $\frac{dV_y}{dt}$?

. Ces mêmes grandeurs dépendent-elles du point considéré sur une trajectoire donnée (vérifiez) ?

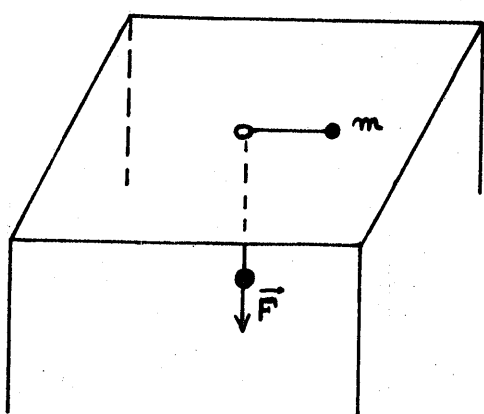
. Quelle propriété physique est associée à cette dernière réponse ?

. Construire sur la même figure (non agrandie) et à la même échelle, une trajectoire de chute libre de votre choix. La valeur de la masse importe-t-elle ?



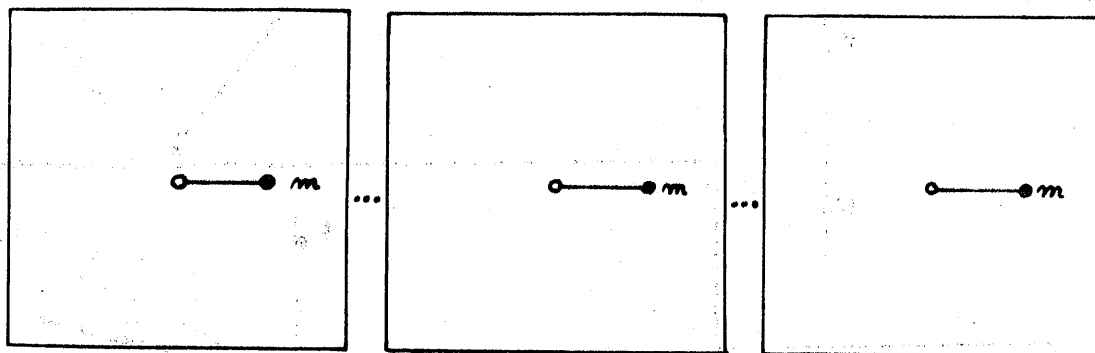
DOCUMENT 3

On vous montre la photo ci-dessous : une table percée en son centre. Une masse m sur la table reliée par une ficelle à travers le trou à un dispositif qui exerce une force constante \vec{F} . Tous les frottements sont nuls, y compris la résistance de l'air.



Cette photo (instantanée) vous renseigne-t-elle complètement sur le mouvement ultérieur de la masse m ?

Représenter le (des) mouvement(s) ultérieur(s) possible(s) par les positions successives correspondantes de m , sur un (des) schéma(s) représentant le dessus de la table vu en plan :



La force exercée sur m dépend-elle

- . de la position ?
- . de facteur(s) autre(s) que la position ? Si oui le(s)quel(s) ?

CINQUIEME PARTIE

LES RAISONNEMENTS SPONTANES EN MECANIQUE
DANS LEUR CONTEXTE HISTORIQUE, GENETIQUE, ET CULTUREL

1907

1908

1909

Les faits que l'on vient de mettre en évidence ne sont pas des phénomènes isolés, relatifs uniquement à une époque spécifique, la nôtre, à un âge particulier, l'adolescence, à un milieu socio-culturel. Quelques notes mentionnées ça et là, au cours de l'exposé, en auront peut-être déjà averti le lecteur.

On se propose, dans les trois chapîtres qui suivent, de situer brièvement les raisonnements spontanés observés ici dans leur contexte historique, génétique et culturel.

Il apparaît que ces modes d'explications sont extrêmement généraux, ce qui confirme largement la stabilité du système dans lequel ils s'inscrivent (cf. tableaux 10, 11 et 12).

QUELQUES FAITS D'HISTOIRE DES SCIENCES

INTRODUCTION

Il n'est pas question de retracer ici, même à grands traits, les péripéties qui, d'Aristote à Newton, ont amené la science occidentale à son étape "classique". Une telle entreprise, même esquissée, ne pourrait se dispenser d'envisager les aspects cosmologiques et philosophiques de la question, d'analyser l'évolution des concepts de lieu, d'espace, de temps, de vide... On se bornera à relever quelques faits qui témoignent d'analogies frappantes entre les raisonnements élaborés par nos ancêtres, dans leur recherche si difficile d'un modèle cohérent, et ceux de nos élèves. L'essentiel des citations est emprunté à A. Koyré, dont l'oeuvre est particulièrement complète et convaincante.

I. CAUSE DU MOUVEMENT, FORCE ET IMPETUS

1. Cause externe, cause interne

La physique d'Aristote n'envisage pas de mouvement sans en rechercher la cause. Cette obsession sera longue à céder le pas aux exigences de la relativité : "et comment nier, remarque A. Koyré*", que le mouvement, beaucoup plus que le repos, ait besoin d'une cause qui l'explique ? En fait, personne, sauf Descartes peut-être, ne s'est jamais demandé pourquoi il y a du repos dans le monde ; tout le monde, au contraire, a toujours cherché la cause, ou la source du mouvement"**.

* A. Koyré, *Etudes Galiléennes*, p. 200

** En 1790, le dictionnaire raisonné de toutes les parties de la physique, de M. Brisson, écrit encore (article "Mouvement") :

1.° Tous les corps, par leur inertie résistent à toute variation d'état. Un corps qui est en repos, ne se mettra donc jamais en *Mouvement*, s'il n'y a une cause qui lui imprime ce *Mouvement*. Cette cause active

qui imprime le *Mouvement* au corps, ou qui du-moins le sollicite à se mouvoir, est ce qu'on appelle la *force motrice*. Il n'y a donc point de *Mouvement* sans force motrice qui l'imprime. (Voyez *FORCE MOTRICE*.)

La réponse d'Aristote est aussi structurée que complexe. Elle s'inscrit dans une conception du Cosmos extrêmement rigide qui n'a été remise en question que par un effet en retour : c'est sur des points relativement spécifiques - le problème du jet, la permanence du mouvement d'un objet séparé du premier moteur - que la critique médiévale a entamé l'édifice de la science établie.

Selon Aristote le milieu ambiant assurait, par un ingénieux système de renvoi, la permanence du mouvement d'un objet que l'on lance ^{*}. Les discussions entre partisans et adversaires d'Aristote retournent en tous sens un certain nombre de faits, difficilement interprétables dans ce cadre.

Ainsi : pourquoi un objet lancé en l'air ralentit-il pour accélérer ensuite ? pourquoi peut-on lancer certains corps plus loin que d'autres ?

Ces questions amènent un autre mode d'explication, qui se fait jour, dès le sixième siècle (J. Philopon) et se développe largement au cours du XIV^{ème} dans l'école dite Parisienne : d'externe la cause du mouvement du projectile devient interne à l'objet.

2. Terminologie

On a coutume de nommer cette théorie : physique de l'impetus. Ce terme désigne précisément une cause interne à l'objet, qui prend le relai du premier moteur pour expliquer la permanence du mouvement du projectile. Mais l'idée se passe du terme, et peut en emprunter bien d'autres :

* On sait que, pour Aristote, un certain nombre de mouvements, dits "naturels", tels la chute des corps ou le mouvement des planètes, n'étaient que la manifestation d'un ordre cosmologique préétabli et de la tendance des objets à s'y conformer. Aristote opposait à cette catégorie celle des mouvements "violents", tel le mouvement vers le haut d'un projectile.

Bonamico, maître de Galilée, dans un bref passage de son "de Motu"* , fournit déjà quatre expressions apparemment équivalentes : "une certaine Force", "impetus", "une certaine gravité", "une puissance de se mouvoir" :

même

dans l'absence du moteur se conserve dans le mobile une certaine force par laquelle le mobile est poussé, tout de même que si le premier moteur était présent. C'est pourquoi dans l'absence de l'impulsion du premier moteur, le mouvement se fait uniquement parce que dans le mobile reste une certaine force, grâce à laquelle il se meut du même mouvement qu'auparavant. Il est vrai cependant que cette force est étrangère et adventice, et qu'elle s'épuise continuellement, mais dans les choses qui se meuvent selon la nature elle augmente ; c'est pourquoi elles vont plus rapidement...

* Que si l'on demande aux auteurs de cette théorie d'où provient et ce qu'est cet *impetus*, ils répondent à cette dernière question qu'il est une certaine gravité, et une véritable puissance et justement une puissance de mouvoir.

On lira plus loin, sous la plume de Benedetti, les termes d' "impetus", "d'impression de mouvement", d' "habitus".

Galilée pratique lui aussi l'impetus, et parle, selon les cas, d'une "virtus motiva", "virtus impressa", d'une "espèce de légèreté", quand il ne s'agit pas, dans la bouche de Salviati**, de "... l'impeto, la puissance, l'énergie ou, voulons-nous dire le moment de descente...".

Mais la multiplicité des termes ne dissimule pas la fonction commune sous-jacente : expliquer le mouvement par une cause inhérente au mobile. On remarque au passage combien la dite fonction s'accommode ou peut-être favorise, toutes les assimilations : force, élan, mouvement, vitesse, puissance, énergie...

Puisqu'il faut convenir d'un mot, c'est le terme historique d'impetus que l'on retiendra, sans perdre de vue que cette notion quelque peu fluctuante, définie avant tout par sa fonction explicative, ne peut se préciser que par un ensemble de propriétés, plus ou moins stables d'un

* F. Bonamici, De Motu I cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 43

** Dialogues III, Scolie de Vivani

auteur à l'autre.

Ces propriétés, on s'en rendra vite compte, désignent tout naturellement comme synonyme de l'impetus une autre expression largement employée dans les pages qui précèdent.

3. Propriétés de l'impetus

3.1. L'impetus attribué à l'objet : c'est là, avec la fonction explicative, pratiquement une propriété de définition. L'impetus est interne à l'objet, et prend même dans certains de ses "synonymes", l'aspect d'une qualité : "une espèce de légèreté". Poussée à l'extrême, cette conception conduit à considérer l'impetus comme occupant exclusif de l'objet, l'impetus d'un mouvement "naturel" notamment, excluant celui d'un mouvement "violent" (au sens d'Aristote). Mais cette idée, que les mouvements se gênent mutuellement, n'a pas véritablement constitué un obstacle fondamental.

Ainsi Bruno, bloqué sur d'autres plans par une conception quasi animiste de l'impetus, n'en était pas moins déjà complètement libéré de cette pseudo-incompatibilité (cf plus loin impetus et relativité).

Benedetti* expliquant la trajectoire d'une pierre lancée par une fronde est, lui aussi, très explicite sur ce point ; voici ce qu'il dit de la vitesse initiale de la pierre :

*« Or, cet impetus impressus décroît continuellement, et petit à petit, l'inclination de la gravité s'y glisse, laquelle, se composant (se mélangeant) avec l'impression faite par la force, ne permet pas que la ligne *ab* reste droite pendant longtemps ; bien vite elle devient courbe, parce que le corps en question est mû par deux vertus, dont l'une est la violence imprimée, et l'autre, la nature. Ceci contrairement à l'opinion de Tartaglia qui nie qu'un corps quelconque puisse être mû simultanément par des mouvements naturel et violent. »*

* J.B. Benedetti, De Mechanicis, cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 50

Ce type de raisonnement est, pour nos contemporains aussi, assez naturel, et il serait bien surprenant d'entendre de nos jours contester la compatibilité d'un élan horizontal et de l'action de la pesanteur.

Si donc cette conséquence extrême d'incompatibilité a été relativement facilement abandonnée, et ne fait pas non plus obstacle actuellement (du moins sous cette forme directe...), il reste le fait essentiel : l'impetus est la force (ou autre chose) de l'objet.

3.2. Introduction de l'impetus dans le mobile :

"Capacité impetussique", durée d'"impression"

Relai du premier moteur, l'impetus doit être transféré de celui-ci au mobile. La transmission du mouvement par l'intermédiaire de l'air, ne faisant intervenir, outre la force du premier moteur, que la forme extérieure du mobile, rend difficilement compte notamment des variations d'efficacité du jet selon la nature du mobile. La doctrine de l'impetus pallie à cette difficulté en introduisant une sorte de "capacité impetussique", différente selon les corps. Ainsi, Bonamico explique* :

C'est pourquoi Philopon et, après lui, Albert, S. Thomas et beaucoup d'autres, ont pensé que la force est imprimée par le premier moteur non point à l'air, mais au mobile, ainsi, à la pierre. Et selon qu'une force plus grande ou plus petite lui est imprimée, le mobile est porté plus loin et plus rapidement ; or, cette force est parfois reçue plus facilement et plus rapidement ; d'autres fois plus difficilement et plus lentement ; ceci en fonction des facteurs qui favorisent le mouvement, tels la forme (géométrique), la grandeur, la quantité de matière, etc., facteurs que nous avons appelés plus haut causes concomitantes du mouvement. Ainsi la lance est portée plus loin qu'un corps carré ; et une corde tendue, parce qu'elle reçoit mieux l'impetus, et le retient plus longtemps que la corde relâchée, vibre plus longtemps et frappe plus fortement.

Galilée, dans ses premières oeuvres**, développe les mêmes arguments, et reprend à ce propos la comparaison déjà classique de l'impetus

* F. Bonamico, De Motu, cité plus haut.

** G. Galilei, De Motu, cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 62

à la chaleur, et des capacités spécifiques correspondantes.

Mais cette aptitude à recevoir l'*impetus* n'est pas le seul facteur en cause. Le processus et la durée de l'impression interviennent aussi, ainsi que l'explique Benedetti* :

Qu'est-ce que cet *impetus*, cette force motrice, cause du mouvement immanent au mobile ? C'est difficile à dire. C'est une espèce de qualité, puissance ou vertu qui s'imprime au mobile ou, mieux, qui l'imprègne, du fait, et par suite, de son association avec le moteur (qui, lui, la possède), du fait et par suite de sa participation au mouvement. C'est aussi une espèce d'*habitus* qu'acquiert le mobile, et cela d'autant plus qu'il est *plus longtemps* soumis à l'action du moteur. Ainsi, par exemple, si une pierre est lancée par la fronde plus loin qu'elle n'est jetée par la main, c'est parce qu'elle fait dans la fronde des révolutions *nombreuses*, ce qui l'« impressionne » davantage...

On retrouve ici, manifestement, l'idée de capitalisation qui sous-tend encore tant de raisonnements contemporains. Comment nier d'ailleurs que cette idée se révèle à la fois simple et apte à rendre compte des faits immédiats ?

Evolution de l'*impetus* au cours du mouvement

On l'a lu plus haut sous la plume de Bonamico, "cette force... s'épuise continuellement, mais dans les choses qui se meuvent selon la nature elle augmente". Si l'épuisement de l'*impetus* au cours du mouvement parut longtemps une chose relativement naturelle**, "car tout agent

* J.B. Benedetti, De Mechanicis, cité plus haut.

** A. Koyré, dans ses études Galiléennes, p. 64, note pourtant : "Que le mouvement violent se ralentisse progressivement, que l'*impetus*, petit à petit, s'épuise, tout le monde, ou presque, l'admettait, sans doute. Du moins, tout le monde admettait bien que tel était le cas normal. Ce qui n'empêchait aucunement ce même tout le monde de croire, dur comme fer, que tout mouvement, et notamment celui du jet, commence par une phase d'accélération. Même les artilleurs de la Renaissance croyaient fermement que le boulet, lancé par le canon, commence par augmenter sa vitesse, et atteint son maximum d'action à une certaine distance de la bouche".

patit en agissant^{*}, ou bien, pour reprendre la comparaison de Galilée^{**}, comme "la chaleur s'affaiblit dans le fer éloigné du feu", on trouve en revanche des tentatives d'explication plus structurées quant à l'accélération du mouvement.

Ainsi Benedetti^{***} décrit-il un processus d'accumulation de l'impetus, dû à un approvisionnement permanent :

« Tout corps grave, qu'il se meuve naturellement ou violemment, reçoit en lui-même un *impetus*, une impression du mouvement, de telle sorte que, séparé de la vertu mouvante, il continue à se mouvoir de lui-même, pendant un certain laps de temps. Lors donc que le corps se meut d'un mouvement naturel, sa vitesse augmentera sans cesse ; en effet, l'*impetus* et l'*impressio* qui existent en lui croissent sans cesse, car il est constamment uni à la vertu mouvante.

Galilée^{****} donne une explication du même type mais beaucoup plus élaborée et complète (sinon plus juste), s'appliquant à la montée ralentie d'un projectile comme à sa descente accélérée. On ne pourra pas, dans ce schéma, ne pas reconnaître les éléments si fréquents dans les raisonnements actuels sur le même thème : intervention d'un capital (F_c), justifiant un mouvement incompatible avec la seule gravité, épuisement progressif du capital par la dite gravité ($F_{ex} = \Delta F_c$), assimilation entre le sommet de la trajectoire ($V=0$) et une position d'équilibre ($F_{totale}=0$), relation linéaire entre Force et Vitesse.

Voici l'analyse qu'en fournit A. Koyré :

Prenons, par exemple, le cas d'un corps pesant lancé verticalement en l'air. S'il s'élève, c'est que nous lui avons imprimé une légèreté *praeter naturam*, qui, justement, le porte vers le haut. Mais, outre cette légèreté *praeter naturam* que nous lui avons imprimée, le mobile garde toujours sa pesanteur naturelle qui, elle, le pousse vers le bas. La légèreté *praeter naturam* doit donc, tout d'abord,

* J.B. Benedetti, cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 48

** Cité plus haut, De Motu.

*** J.B. Benedetti, De Mechanicis, cité plus haut.

**** G. Galilei, De Motu, cité par Koyré, Etudes Galiléennes, p. 68-69

compenser la résistance ou action naturelle du poids : le corps ne s'élèvera, en général, que si la légèreté imprimée au corps est plus grande que son poids ; il ne s'élèvera, en outre, que dans la mesure où elle le sera. En effet, c'est seulement ce surplus, la différence entre la légèreté *praeter naturam* et le poids naturel, qui entre en action pour produire le mouvement ascensionnel.

Or, en produisant ce mouvement ascensionnel, la légèreté *praeter naturam* (comme toute force impressée) s'épuise par et dans son action même. A un moment donné le « surplus » sera tout dépensé. Le corps, alors, cessera de monter et commencera à descendre en vertu de sa propre gravité naturelle.

Toutefois, et c'est là le point important, ce n'est pas toute la légèreté *praeter naturam* qui se trouve épuisée à cet instant, mais seulement son « surplus ». Le moment où commence la descente est, en effet, celui où la légèreté *praeter naturam* et la pesanteur naturelle s'équilibrent exactement. Le corps qui tombe n'est donc pas soumis à l'action de la pesanteur seule, mais aussi à celle de la légèreté précédemment imprimée ou, plus exactement, de ce qui en reste. Or, il en reste une quantité non négligeable (égale au poids) et, si elle n'est plus capable de faire monter le corps en question, elle est suffisante pour retarder son mouvement de descente. En effet, la force qui porte le corps vers le bas, ce n'est pas toute sa pesanteur, mais seulement le surplus de la pesanteur sur la légèreté impressée. Et c'est à mesure que ce surplus augmente (par suite de la diminution de la légèreté impressée qui s'épuise dans et par son action retardatrice) que la vitesse de la chute augmente également. Jusqu'au moment où, la légèreté ayant été entièrement épuisée, le corps, sous l'action de la pesanteur seule, se meut avec une vitesse désormais uniforme.

3.4. Relation entre Impetus et Vitesse, entre Force et Vitesse

Plus ou moins implicite dans les textes qui précèdent, on trouve enfin l'une des propriétés de l'impetus la plus liée à sa fonction explicative : la relation directe, pour ne pas dire linéaire, entre Impetus et Vitesse, et, puisque les termes sont souvent équivalents, entre Force et Vitesse.

Il n'est guère besoin de mettre ce lien en évidence, les citations précédentes y suffiraient déjà, d'autres suivront. On peut s'interroger,

en revanche, sur sa nature, sur ses conséquences.

La nature de ce lien semble radicalement liée à la genèse même du concept d'impetus : défini comme cause du mouvement, l'impetus-force se doit d'être proportionné à son effet-vitesse, car "toute cause - si l'on en croit Leibniz^{*} - a la même puissance que l'effet total". Qu'il y ait finalement assimilation entre le concept-cause et l'effet-mouvement semble un passage à la limite de ce processus, qui ne nécessite nullement que l'on invoque une "équivoque verbale entre l'impetus : force motrice, et impétuosité : qualité ou propriété du mouvement"^{**}. L'assimilation, ou la relation linéaire entre Force et Vitesse se retrouve d'ailleurs dans des textes ne se fondant pas sur la notion d'impetus, ou du moins n'en utilisant pas le terme.

. Il ne s'agit pas d'un physicien de l'école Parisienne, mais bien de Descartes lorsque Koyré^{***} constate, commentant la célèbre controverse avec Beekman :

Descartes, décidément, n'a pas compris les « principes » de Beeckman ; aussi laisse-t-il, tout simplement, tomber la conquête intellectuelle de celui-ci : le principe de la conservation du mouvement. Il le remplace par celui de la force. Il part de cette idée que la *vitesse* est proportionnelle à la *force* ; et en conclut qu'une force constante produit une vitesse constante. Il retombe donc dans la conception classique de la physique de l'*impetus*. Il s' imagine que si le corps qui tombe accélère son mouvement, c'est parce qu'il est plus fortement attiré par la terre à la fin de son mouvement qu'à son début ou, pour parler son langage, parce que la force attractive de la terre produit dans la pierre une force motrice grandissante : aussi additionne-t-il (le passage que nous citons correspond à la première hypothèse étudiée dans le texte des *Cogitationes Privatae* que nous avons cité plus haut) les forces agissantes, et non simplement les vitesses

. Descartes encore, dans son "Monde"^{****}, utilise le terme

* Leibniz, Remarques sur la partie générale des principes de Descartes.

** Selon A. Koyré, Etudes Galiléennes p. 34, cette équivoque fondait en grande partie la solution des partisans de l'impetus pour la chute accélérée.

*** A. Koyré, Etudes Galiléennes p. 118

**** Le Monde, cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 130.

de "force" où nous écrivions "vitesse", et ceci bien que le mouvement soit déjà pour lui un "état", "la notion la plus simple que nous possédions" et le futur pivot de toute explications physique :

Aussi, la première des « règles » selon lesquelles Dieu fait agir la matière est-elle : « Que chaque partie de la matière, en particulier, continue toujours d'être en un même état , pendant que la rencontre des autres ne la contraint point de le changer. C'est-à-dire que ... si elle est arrêtée en quelque lieu, elle n'en partira jamais, que les autres ne l'en chassent ; et si elle a une fois commencé à se mouvoir, elle continuera toujours avec une égale force, jusques à ce que les autres l'arrêtent ou la retardent »

. Kepler, tentant de trouver les forces motrices agissant sur les planètes à partir de la loi des Aires, trouva des forces inversement proportionnelles aux rayons vecteurs, et ceci parce qu'il avait, entre autres erreurs, considéré les forces comme proportionnelles aux vitesses.

Ces erreurs historiques ne sont que des points d'affleurement plus remarqués d'une pratique encore très courante chez les penseurs du début du XVII^e siècle, et dont on montrera qu'elle s'étend bien au-delà encore*.

* Ainsi M. Brisson, déjà cité, écrit dans son "Dictionnaire raisonné..." en 1790, à propos du Pendule (p. 292) :

Ce théorème est confirmé par l'expérience dans un nombre fini d'oscillations : mais si on les supposoit continuées à l'infini, on appercevrait enfin quelque différence ; car la résistance de l'air & le frottement autour du centre C, détruira une partie de la force acquise en tombant : ainsi le corps ne remontera pas précisément au même point.

et à propos de Vitesse uniforme (p. 744) :

L'inégalité ou la non-uniformité de tous les mouvements que nous connoissons, est une démonstration contre le mouvement perpétuel mécanique, que tant de gens ont cherché ; il est impossible, vu les pertes continuelles de forces que font les corps en mouvement, par la résistance des mi-

lieux dans lesquels ils se meuvent, le frottement de leurs parties, &c. Ainsi, afin qu'un mouvement perpétuel mécanique pût s'exécuter, il faudroit trouver un corps qui fût exempt de frottement, ou qui eût reçu du Créateur une force infinie, par laquelle il surmontât des résistances à tous moments répétées.

3.5. Impetus - grandeur mi-scalaire - mi-vectorielle

Ces premières remarques suffisent déjà pour mettre en lumière le statut assez particulier de l'impetus quant à son caractère orienté (sinon vectoriel) ou non. Cause de mouvement, l'impetus est, de ce fait, orienté.

On parle ainsi de "l'impetus de se mouvoir selon la tangente à un cercle" ou selon telle ou telle ligne droite... Mais en tant que capital stocké par divers processus, d'apparence parfois désorientée (tels les nombreux tours de la fronde), en tant que qualité de l'objet comparée souvent à la chaleur, ce terme évoque aussi un scalaire au même titre que le terme actuel d'élan.

F. Halbwachs* souligne dans une étude récente ce que l'erreur de Descartes sur la loi des chocs doit à cette conception. Ce n'est pas tant l'outil mathématique vectoriel qui manque à Descartes pour établir la loi de conservation de la quantité de mouvement**, qu'une conception du mouvement clairement libérée des adhérences de l'impetus.

4. Impetus et relativité

Il faut rendre cette justice à l'impetus : s'il implique une assimilation incorrecte entre Force et Vitesse, et donc mène à des erreurs ou des blocages dès qu'il s'agit d'analyser de près la chute des corps, le mouvement des planètes ou les lois des chocs, on a déjà pu remarquer l'interprétation simple qu'il permet pour des faits immédiats, tel un jet de pierre. Cette notion a le mérite non moins négligeable d'avoir été compatible avec (sinon à la source de ...) une première formulation de ce qui sera la relativité Galiléenne. Examinant le

* F. Halbwachs, Le Problème de la découverte des possibles dans l'élaboration des lois des chocs au XVII^e siècle, 1977.

** La loi proposée par Descartes est une loi scalaire. Cf Principes de la philosophie, Deuxième partie.

problème mille fois retourné de la pierre jetée du mât d'un navire, l'assimilant à celui des projectiles terrestres, Bruno* dégage la notion de relativité physique, qui implique l'impossibilité de détecter le mouvement d'un référentiel par une expérience interne.

Sans doute, si « d'un lieu extérieur à la terre quelque chose était jeté en terre (cette chose) par suite du mouvement de la terre, perdrait la rectitude (de son mouvement), comme il apparaît dans le navire, lorsque celui-ci descend le fleuve : si quelqu'un, qui se trouve sur la rive, vient à jeter une pierre tout droit vers le navire, il manquera son but, et cela en proportion de la vitesse du navire. Mais que quelqu'un soit placé sur le mât de ce navire, et que celui-ci courre aussi vite qu'on voudra, son jet ne sera pas faussé d'un point. De sorte que la pierre, ou toute autre chose grave, jetée du mât vers un point situé au pied du dit mât, ou en quelqu'autre partie de la cale ou du corps du navire, y viendra en ligne droite. De même si quelqu'un qui se trouve dans le navire jette en ligne droite (verticale) une pierre vers le sommet du mât, ou vers la hune, cette pierre reviendra en bas par la même ligne, de quelque manière que le navire se meuve, pourvu qu'il n'éprouve pas d'oscillations ».

Il n'est pas possible de s'attarder ici sur la hardiesse des vues de Bruno, sur ce que ses idées ont apporté à Galilée, ni sur ce qu'il lui en a coûté. Les raisons qui empêchèrent Bruno de recueillir lui-même les fruits de ses intuitions sont complexes et controversées. Sans doute peut-on invoquer, avec Koyré, l'incapacité de Bruno à fonder son génie précurseur sur une métaphysique rénovée, qui donnerait au mouvement son statut ontologique, et révoquerait tout animisme.

Sans conclure personnellement, on voudrait simplement souligner à quel niveau de réussite a pu parvenir un partisan d'une doctrine périmée, avec des raisonnements de ce genre :

la pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire, et par conséquent se meut selon le mouvement de celui-ci, possède une certaine vertu impressée, que ne possède pas l'autre, celle qui vient de la main de celui qui est en dehors du navire ; et cela bien que les (deux) pierres aient la même gravité et que, si elles partent, — autant que faire se peut —, du même point et ont subi la même poussée, elles aient le même air à traverser.

* Giordano Bruno, cité par A. Koyré, *Etudes Galiléennes*, p. 173.

la pierre qui part de la main de celui qui est porté par le navire, et par conséquent se meut selon le mouvement de celui-ci, possède une certaine vertu impressée, que ne possède pas l'autre, celle qui vient de la main de celui qui est en dehors du navire ; et cela bien que les (deux) pierres aient la même gravité et que, si elles partent, — autant que faire se peut —, du même point et ont subi la même poussée, elles aient le même air à traverser.

Comment s'étonner, dès lors, que le raisonnement spontané, si proche de la doctrine de l'impetus, ne perçoive pas ses limites ni ses incohérences, quand il peut s'adapter si bien à l'analyse de faits déjà relativement complexes ?

II. LE MOUVEMENT POUR LUI-MÊME

La physique n'a véritablement basculé des conceptions médiévales vers une théorie classique qu'à partir du moment où elle n'a pas cherché une cause au mouvement mais a su considérer ce dernier pour lui-même. Gassendi** est l'un de ces précurseurs qui dès 1642 règle son compte à l'impetus, remet la force à sa place (dans le moteur), et aboutit à une formulation classique du principe d'inertie.

J'ajoute, nous dit Gassendi, que par là on peut comprendre ce qu'il faut penser de la difficulté habituellement élevée au sujet de la force imprimée aux projectiles. On demande, en effet : que fait-elle dans le mobile ? comment s'y imprime-t-elle ? comment perdure et comment disparaît-elle ? Or donc, on la tient habituellement pour une force active mouvant la pierre ; il paraît cependant que la force active, qui est la cause de la projection, est dans le projetant lui-même, et nullement dans la chose projetée, qui est purement passive. Ce qu'il y a dans la chose projetée, c'est du mouvement, lequel, bien qu'il soit parfois appelé force, *impetus*, etc. (comme nous l'avons fait nous-même, lorsque, afin d'être plus facilement compris, nous avons gardé, autant que possible, des appellations familières), n'est, cependant, en réalité, rien d'autre que le mouvement même.

* Giordano Bruno, déjà cité.

** Gassendi, *De Motu*, cité par A. Koyré. *Etudes Galiléennes*, p. 316.

Et sans doute un seul et même mouvement est bien, selon Aristote, action en même temps que passion ; action en tant qu'il est dans le moteur, passion en tant qu'il est dans le mobile ; car dans le moteur est une force active au moyen de laquelle est mû le mobile ; et tant que le mobile se meut on n'a pas à chercher en lui une force active, qui ne se trouve que dans le moteur, mais une passive seulement, qui est en lui et qui, ainsi que l'on dit, est amenée à l'acte. Or rien n'empêche que le moteur soit séparé, ou même périsse, et que le mouvement reçu perdure. Car on ne requiert pas le moteur afin que, en dehors du mouvement, il transmette au mobile une force, qui ensuite produirait le mouvement ; mais il suffit qu'il produise dans le mobile un mouvement, qui puisse continuer sans lui. Or le mouvement peut le faire, car telle est la propriété de sa nature, pourvu qu'il ait un sujet perdurable, et que rien de contraire ne lui arrive ; il a la faculté de persévérer sans action continue de sa cause. »

Un texte aussi net ouvre largement les portes à la théorie classique et, semble-t-il, débarrasse bien des obstacles. Mais il est frappant d'observer combien, bien avant que le terrain ne soit ainsi déblayé, Galilée avait pu avancer en évitant les pièges encore non désamorçés. Dans un texte dont la date est controversée*, mais qui appartient à ses premiers écrits, Galilée étudie la chute accélérée des corps. On observera qu'il n'est nulle part question de force, et que sans cesse vitesses, espaces, et temps sont là pour nous rappeler "l'affinité suprême entre le mouvement et le temps".

« Puis donc que je vois que la pierre qui descend de la hauteur à partir du repos acquiert constamment de nouveaux accroissements de vitesse, pourquoi ne croirais-je pas que ces additions se font de la manière la plus simple et la plus obvie de toutes ? Le mobile est le même, le même aussi le principe du mouvement. Pourquoi le reste ne le serait-il pas également ? Tu diras : la vitesse est donc la même [uniforme]. Nullement. Il est en effet constant que la vitesse n'est pas la même, et que le mouvement n'est pas uniforme. Il faut donc rechercher et poser l'identité, ou si l'on préfère, l'uniformité et la simplicité non dans la vitesse, mais dans l'accroissement de la vitesse, c'est-à-dire, dans l'accélération. Que si nous l'examinons attentivement, nous ne trouverons aucun accroissement plus simple que celui qui surajoute toujours de la même manière. Or, quelle est cette manière, nous le comprendrons facilement pourvu que nous fixions notre attention sur l'affinité suprême [qui existe] entre le mouvement et le temps. De même, en effet, que l'uniformité et l'égalité du mouvement se définissent et se conçoivent par l'égalité des temps et des espaces (nous appelons, en effet, uniforme une translation où des espaces égaux sont parcourus dans des temps égaux), de même, pouvons-nous concevoir des égalités d'accroissement de vitesse s'effectuant pendant ces mêmes parties du temps, en comprenant par l'esprit que le mouvement uniformément et, par conséquent, continuellement accéléré est celui où, dans des temps égaux — quelconques — se surajoutent des accroissements égaux de vitesse. »

A un mode d'analyse causal où la Force intervient partout et le Temps le moins possible, aux erreurs primitives d'un Descartes, se substituent la considération purement cinématique du mouvement, la prise en compte scrupuleuse du Temps et les succès d'un Galilée.

Lorsque celui-ci reprend le problème de Bruno, dans les Dialogues, c'est encore de mouvement dont il parle, et non plus de quelque vertu impresse ^{*}. (L'impetus n'est utilisé par Salviati qu'au début de l'argumentation et comme pour s'adapter à l'auditoire) :

La pierre qui est sur le sommet du mât de ce navire, ne se meut-elle pas aussi, portée par celui-ci, sur la circonférence d'un cercle et, par conséquent, d'un mouvement qui est indélébile en elle tant que les obstacles extérieurs sont écartés ? Et ce mouvement n'est-il pas d'une vitesse égale à celle du navire ? »

Plus loin dans le même ouvrage, il ne sera question que de la vitesse avec laquelle on lance une flèche, à longueur de pages, sans que le mot force ne vienne dans la bouche de Salviati.

Les textes célèbres qui sont l'aboutissement de cette méthode font apparaître encore, bien sûr, cette prééminence du mouvement pour lui-même dans la physique Galiléenne. Voici celui qui pose le principe de la relativité physique du mouvement ^{**} :

« Notons donc : le mouvement est mouvement et agit comme mouvement en tant seulement qu'il est en rapport avec les choses qui en sont privées ; mais, en ce qui concerne celles qui y participent toutes également, il est sans effet ; il est comme s'il n'était pas »

Que ce principe d'inertie soit circulaire parce qu'il est faussé par l'intervention constante de la gravité, ou qu'il constitue une

^{*} G. Galilei, Dialogo II, p. 173, cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 230.

^{**} G. Galilei, Dialogo II, P. 148, id. p. 221.

authentique amorce de la Relativité Générale, comme l'affirme Mme Tonnelat*, il faut pour conclure, plus d'éléments que l'on ne peut en discuter ici.

Mais, quoi qu'il en soit, on peut constater que la gravité intervient beaucoup plus chez Galilée pour définir les conditions réelles d'un mouvement libre que comme cause des mouvements accélérés : Galilée s'est beaucoup plus soucié d'analyser ces mouvements dans leur rapport avec le temps que de les interpréter par des considérations dynamiques. L'interprétation causale, dans la plus grande partie de son oeuvre, ne va guère plus loin que cette constatation : une bille lâchée sur un plan incliné accélère spontanément vers le bas, et doit être lancée pour remonter.

Galilée explicite d'ailleurs son absence totale d'illusions quant à la recherche des causes. Ainsi, ce passage des Dialogues** où Salviati répond à Simplicio qui pense savoir, comme tout le monde, ce qu'est la pesanteur :

« Vous faites erreur, Sign. Simplicio, vous auriez dû dire : tout le monde sait qu'on l'appelle la pesanteur. Or, je ne vous demande pas le nom, mais l'essence de la chose : de cette essence vous ne savez pas plus que vous ne savez de l'essence du principe du mouvement circulaire des étoiles, sauf le nom qu'on lui a donné et qui nous est devenu familier et habituel par suite de l'expérience fréquente que nous en faisons mille fois par jour. En fait, nous ne comprenons pas plus quel est le principe et la vertu qui meut la pierre vers le bas que nous ne savons ce qui la pousse vers le haut, lorsqu'elle est séparée de ce qui la projette, ou ce qui meut la lune en

* M.A. Tonnelat, Histoire du principe de relativité (Flammarion) p. 57 "Pour Galilée, comme pour Einstein, un corps "grave" se meut "librement" et sa trajectoire est une surface courbe que nous pourrions appeler "surface d'égale gravité".

Et :

"C'est pourquoi l'on peut affirmer, sans aucun paradoxe, que l'intuition des principes d'une authentique Relativité Générale a empêché Galilée de formuler clairement les bases d'une Relativité Restreinte".

** Dialogues, cité par A. Koyré, Etudes Galiléennes, p. 243.

cercle, sauf, comme je l'ai dit, le nom propre et spécial que nous avons assigné, à savoir à celui-ci, celui de la *gravité*, tandis que pour celui-là nous employons le terme plus général de *vertu impressa*, et pour le dernier nous parlons de l'intelligence, ou de forme assistante, ou informante, et à une infinité d'autres nous donnons pour raison la *nature*. »

Sans doute ce renoncement à l'interprétation causale dynamique, cette adhérence au seul fait cinématique, considéré dans son "affinité suprême" avec le temps constituent-ils une étape nécessaire*, historiquement comme dans la démarche personnelle de chacun, pour accéder au modèle formel Newtonien.

Ceci dit, on observe que dans cette ascèse, des Gassendi ou des Galilée se sont montrés parfois plus Newtoniens que Newton lui-même. Le père de la Mécanique classique, qui fit la synthèse magistrale du principe d'inertie, des lois de Kepler, des résultats de Hooke et des calculs de Huyghens sur le mouvement circulaire, entre autres..., réintroduit dans la formulation de ces lois des notions qui en auraient sans doute interdit l'élaboration, si d'autres n'y avaient pas renoncé avant lui. Dans les textes qui suivent, on retrouvera les expressions familières de "principe causal", "force interne", "force qui réside dans le corps", "vis insita", "impressa"... : **

Déf. V. La force est le principe causal du mouvement et du repos. Et elle est soit un principe externe qui engendre ou détruit ou modifie de quelque manière le mouvement qu'il imprime à un corps quelconque, soit un principe interne par lequel le mouvement ou le repos mis dans un corps est conservé ; et tout être s'efforce de persévérer dans son état et oppose de la résistance à ce qui l'en empêche...

Il y a, évidemment, un élément décisif : force "externe" et force "interne" sont clairement distinguées, et cette dernière baptisée

* Cette remarque rejoint en partie, mais ne s'identifie pas, à la thèse de Koyré selon laquelle le "verrou" était d'ordre métaphysique : de "processus" le mouvement est devenu un "état".

** Cité par A. Koyré, *Etudes Newtoniennes*, p. 224.

"force d'inertie"* :

D É F I N I T I O N I I I .

La force qui réside dans la matière (vis insita) est le pouvoir qu'elle a de résister. C'est par cette force que tout corps persévère de lui-même dans son état actuel de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite.

Cette force est toujours proportionnelle à la quantité de matière des corps, & elle ne diffère de ce qu'on appelle *l'inertie de la matière*, que par la manière de la concevoir : car l'inertie est ce qui fait qu'on ne peut changer sans effort l'état actuel d'un corps, soit qu'il se meuve, soit qu'il soit en repos ; ainsi on peut donner à la force qui réside dans les corps le nom très-expressif de *force d'inertie*.

D É F I N I T I O N I V .

La force imprimée (vis impressa) est l'action par laquelle l'état du corps est changé, soit que cet état soit le repos, ou le mouvement uniforme en ligne droite.

Il est malgré tout remarquable de voir réapparaître sur la ligne d'arrivée des notions intuitives qui, en chemin, ont constitué autant d'obstacles. L'étude du mouvement circulaire est sans doute encore plus instructive sur ce point.

III. LA FORCE CENTRIFUGE

Les textes de Galilée concernant le mouvement circulaire ne se caractérisent plus du tout par la seule considération du mouvement effectif dans son rapport avec le temps.

Les Dialogues** nous présentent Salviati et Simplicio confrontés au problème de la pierre qui tourne au bout d'une ficelle. Salviati essaie...

* Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle, (1687).

** Dialogues, cité par A. Koyré, p. 260... Etudes Galiléennes.

« de montrer encore plus clairement combien il est vrai que les corps graves qui tournent rapidement autour d'un centre immobile, acquièrent un *impetus* de se mouvoir en s'éloignant de ce centre. Attachons à l'un des bouts d'une corde un récipient rempli d'eau, et tenons l'autre bout fortement dans la main ; que le bras et la corde soient le semi-diamètre, et la jointure de l'épaule, le centre ; faisons tourner rapidement le vase, de telle façon qu'il décrive une circonférence d'un cercle. Or, qu'il soit parallèle à l'horizon, ou vertical, ou incliné d'une manière quelconque, il s'ensuivra dans tous les cas que l'eau ne s'écoulera pas du vase, et aussi que celui qui le fait tourner sentira tout le temps la corde le tirer et faire un effort pour s'éloigner de l'épaule ; et si au fond du récipient on faisait un trou, on verrait l'eau en jaillir aussi bien vers le ciel que latéralement ou vers la terre. Et si au lieu de l'eau on y mettait de la pierraille, on sentirait la même force tirer la corde ; et, enfin, on voit les enfants lancer des pierres à une grande distance en fixant les dites pierres au bout d'un bâton qu'ils font tourner rapidement : arguments qui, tous, confirment la vérité de la conclusion selon laquelle la rotation confère au mobile un *impetus* vers la circonférence, lorsque le mouvement est rapide

Revoilà donc l'*impetus*, assorti d'une inextricable confusion quant à la direction, puisqu'il s'agit, à quelques lignes d'intervalle, d'un "*impetus* de se mouvoir par la droite tangente"^{*} et d'un "*impetus* vers la circonférence", quand il ne s'agit pas d'expressions encore plus floues, telles que "cause de projection", "effort vers l'extérieur"...

On perçoit nettement dans ces textes la difficulté considérable qu'il y a à ne considérer là que le mouvement et la façon dont il se modifie, car enfin "on sentirait la... force tirer la corde" ! Action et Réaction entre corde et pierre sont "égales et opposées"... mais appliquées chacune à un corps différent (fig. 5a) L'affectation des deux forces à la pierre n'exige que le déplacement d'un point

* Il arrive là encore parfois, comme chez nos étudiants, que la Force Centrifuge elle-même soit tangente au cercle. Ainsi ce texte de 1790 : Dictionnaire raisonné de toutes les parties de la Physique, M. Brisson :

Il est certain que la Lune ne circule autour de la Terre, qu'en conséquence de deux puissances qui agissent en même-temps sur elle ; l'une la force centripète, qui la pousse ou la tire vers la Terre dans la direction du rayon LT de son orbite ; & l'autre la force centrifuge, résultante de son mouvement de circulation, qui la pousse dans la tangente LF .

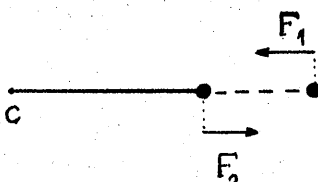
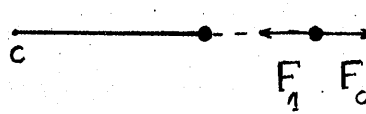
a	 <p> F_1 : force exercée par la corde <u>sur la pierre</u> F_2 : force exercée par la pierre <u>sur la corde</u> Action et Réaction sont "égales et contraires" </p>
b	 <p> F_c : force centrifuge "équilibre" de la pierre sur son orbite </p>

Figure 5

Deux schémas de forces pour une pierre
 qui tourne au bout d'une ficelle.

Les schémas a et b sont l'un correct (a),
 l'autre incorrect (b) dans un repère galiléen.

Ils sont très couramment identifiés l'un
 à l'autre.

d'application* (fig. 5b) et permet de satisfaire l'implication intuitive "vitesse radiale nulle \Rightarrow force totale nulle". Comment résister, même lorsque l'on sait que l'impetus est "de se mouvoir par la droite tangente".

Kepler ne réclamait-il pas "une force animale ou de quelque nature" pour retenir "la lune sur son orbe" et l'empêcher de tomber.

Newton n'a pas laissé dans ses Principes, la moindre incohérence sur ce point. Il s'agit bien finalement de la force centripète et du mouvement tangentiel que prendrait le mobile sans cette force:

DÉFINITION V.

La force centripète est celle qui fait tendre les corps vers quelque point, comme vers un centre, soit qu'ils soient tirés ou poussés vers ce point, ou qu'ils y tendent d'une façon quelconque.

La gravité qui fait tendre tous les corps vers le centre de la terre; la force magnétique qui fait tendre le fer vers l'aimant, & la force, quelle qu'elle soit, qui retire à tout moment les pla-

* Il arrive aussi que ce type de raisonnement conduise, au contraire, à des difficultés. Il faut dès lors modifier la 3ème loi de Newton pour satisfaire au schéma intuitif : s'il y a mouvement la "résultante" des forces n'est pas nulle (cf sur ce point l'exercice du P.C.E.M. : Action du ressort > réaction de la masse...).

Ainsi ce texte du dictionnaire de M. Brisson (1790) déjà cité :

REACTION. Action d'un corps sur un autre corps qui le choque ou qui le comprime. Cette action consomme toujours une partie de la force du corps qui choque ou qui comprime; & cette partie consommée est égale à la Réaction. C'est pour cela que l'on dit que la Réaction est égale à l'action ou à la compression. Et c'est là un axiome reçu de tous les Physiciens. En effet, autant un cheval tire une voiture en avant, autant la voiture retire le cheval en arrière: & si le cheval n'avait que la force nécessaire

pour contrebalancer la résistance de la voiture, il n'avanceroit pas. Ainsi il n'avance que parce qu'après avoir employé une partie de sa force à faire équilibre à cette résistance, il lui en reste encore pour la vaincre & l'emporter.

[C'étoit un axiome dans les écoles, qu'il n'y a point d'action sans Réaction. Mais on ignoroit que la Réaction est toujours égale à l'action. C'est Newton qui a fait le premier cette remarque,

On peut ajouter que Newton, lui, en assumait plus volontiers les conséquences : le cheval n'avait pas besoin, dans les Principes, de tirer plus fort que la pierre qu'il trainait pour avancer !

nètes du mouvement rectiligne, & qui les fait circuler dans des courbes, font des forces de ce genre.

La pierre qu'on fait tourner par le moyen d'une fronde, agit sur la main, en tendant la fronde, par un effort qui est d'autant plus grand, qu'on la fait tourner plus vite, & elle s'échappe aussitôt qu'on ne la retient plus. La force exercée par la main pour retenir la pierre, laquelle est égale & contraire à la force par laquelle la pierre tend la fronde, étant donc toujours dirigée vers la main, centre du cercle décrit, est celle que j'appelle *force centripète*. Il en est de même de tous les corps qui se meuvent en rond, ils font tous effort pour s'éloigner du centre de leur révolution; & sans le secours de quelque force qui s'oppose à cet effort & qui les retient dans leurs orbes, c'est-à-dire, de quelque *force centripète*, ils s'en iroient en ligne droite d'un mouvement uniforme.

Malin la démarche adoptée pour introduire la force centripète, et les expressions choisies laissent la porte ouverte à toutes les interprétations intuitives habituelles : l'affirmation que la force centripète est "égale et contraire" à la force exercée par la pierre sur la ficelle, au bout de laquelle elle tourne est parfaitement exacte (fig. 5a), mais elle renforce l'intuition d'un équilibre entre deux forces (fig. 5b). Or il ne s'agit en fait que de l'égalité entre l'Action et la Réaction, laquelle, on le sait, serait compatible avec n'importe quel mouvement de la pierre, et n'a rien à voir avec l'équilibre radial.

Cette intuition d'un "équilibre" est encore renforcée par l'affirmation que les corps "font... effort pour s'éloigner du centre" et que

"sans le secours d'une force qui s'oppose à cet effort" les dits corps partiraient tout droit.

On reste encore plus perplexe, lorsque Newton^{*}, pour démontrer l'existence de mouvements réels et par là celle d'un espace absolu, invoque non pas les forces nécessaires pour produire de tels mouvements, mais les forces "qu'ont les corps" soumis à de tels mouvements^{**}:

* Principia, cité par A. Koyré, Etudes Newtonniennes, p. 126

** Note : la force centrifuge, effet du mouvement ; élimination de la vitesse linéaire. — On l'aura noté, la force centrifuge apparaît bien comme un effet du mouvement circulaire. Un fait semble devoir être rattaché à cette conception ; Galilée, dans ses Dialogues (II), fait développer par Salviati la démonstration de la loi suivante : la cause de la projection, ou l'impetus vers la circonférence ne dépend que de la vitesse angulaire. En effet...

... il ne faudrait pas que quelqu'un crût que la cause de la projection dans la grande roue croîtrait en proportion de la vitesse de sa circonférence à la vitesse de la circonférence de la petite roue, parce que ce serait absolument faux...

... Car seule importe la vitesse angulaire, comme l'a fort bien compris Sagredo :

« la rotation de la terre ne sera pas plus suffisante pour projeter les pierres que ne le sera celle d'une petite roue quelconque qui tourne si lentement que, en vingt-quatre heures, elle ne fait qu'une seule révolution ».

Koyré lui-même d'ailleurs semble bien souscrire à cette affirmation :

L'assertion de Sagredo selon laquelle le mouvement extrêmement rapide de la surface terrestre est aussi peu capable de projeter une pierre que le mouvement extrêmement lent de la circonférence d'une roue d'un mètre de diamètre, est juste.

Cette élimination de la vitesse linéaire témoigne sans doute de l'estampille tout à fait particulière qui marque la force centrifuge : réservée au circulaire, affaire de rotation (et de rotation complète).

Nul en effet avant la synthèse Newtonnienne, ni même après, n'aurait spontanément assimilé la force centrifuge aux effets d'autres types de changements de direction, ceux de la chute oblique par exemple.

Les effets par lesquels on peut distinguer le mouvement absolu du mouvement relatif, sont les forces qu'ont les corps qui tournent pour s'éloigner de l'axe de leur mouvement; car dans le mouvement circulaire purement relatif, ces forces sont nulles, et dans le mouvement circulaire vrai et absolu elles sont plus ou moins grandes selon la quantité du mouvement .

Et pourtant, là encore, il y eut un précurseur pour tracer le chemin, formuler le problème de manière plus strictement classique et n'associer de force qu'à la modification effective du mouvement. C'est Hooke qui écrit* en 1674, sans mentionner la moindre force centrifuge, ni le moindre effort vers l'extérieur :

1^o Que tous les corps célestes, sans en excepter aucun, ont une attraction ou gravitation vers leur propre centre, par laquelle, non seulement ils attirent leurs propres parties et les empêchent de s'écarter, comme nous le voyons de la Terre, mais encore ils attirent tous les autres corps célestes qui sont dans la sphère de leur activité; que, par conséquent, non seulement le Soleil et la Lune ont une influence sur le corps et le mouvement de la Terre, et la Terre une influence sur le Soleil et la Lune, mais aussi que Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne ont par leur force attractive une influence considérable sur le mouvement de la Terre, comme aussi l'attraction réciproque de la Terre a une influence considérable sur le mouvement de ces planètes.

2^o Que tous les corps qui ont reçu un mouvement simple et direct continuent à se mouvoir en ligne droite, jusqu'à ce que par quelque autre force effective ils en soient détournés et forcés à décrire un cercle, une ellipse ou quelque autre courbe plus compliquée.

3^o Que les forces attractives sont d'autant plus puissantes dans leurs opérations que le corps sur lequel elles agissent est plus près de leur centre.

Mais le schéma intuitif regagne du terrain une fois la loi élaborée, bien maîtrisée par Newton lui-même, mais si compatible avec la présentation du résultat, si proche derrière la formulation adoptée, que l'on comprend aisément qu'il ait allègrement survécu à cette mise au point. Il n'est, pour s'en convaincre, que de lire l'interprétation que Koyré lui-même fait de l'approche Newtonnienne** :

* A. Koyré, Etudes Newtonniennes, p. 20

** id. p. 18

Newton part carrément du problème astronomique, du « fait astronomique » révélé par Kepler. Les planètes tournent autour du Soleil. Elles sont donc retenues auprès de lui par des forces centripètes qui contrebalancent exactement les forces centrifuges engendrées par leur mouvement. Quelles sont ces forces ? Pour répondre à cette question il faut non pas déterminer leur nature, mais évaluer leurs intensités. Et pour ce faire il faut tout d'abord déterminer celles des forces centrifuges en question, puis, en tenant compte des faits concrets concernant les mouvements planétaires, c'est-à-dire des lois de Kepler, calculer les forces centripètes.

CONCLUSION

Les textes cités dans ces quelques pages sont éloquents. Sans doute n'est-il plus nécessaire d'insister sur ce qui rapproche l'impetus du Capital de Force, ni sur la façon dont, au cours des siècles, la Force Centrifuge se passe de repère.

Peut-être est-il plus remarquable encore d'observer que les mêmes attitudes mentales constituent d'abord des obstacles, dont quelques esprits originaux se débarrassent plus ou moins radicalement, puis qu'elles se concilient finalement, dans un compromis diversement bien maîtrisé, avec la théorie qui s'est élaborée entre temps. Ce processus semble extrêmement significatif de la prégnance des raisonnements intuitifs. Pour ne pas leur donner tous les torts, on pourra remarquer que certains de ces raisonnements se sont révélés non pas en retard mais prodigieusement en avance, et soutenir que ne pas distinguer la nature des deux termes de la loi Newtonnienne $\vec{F} = m\vec{\gamma}$, c'est annoncer le principe d'équivalence. Mais ceci est une autre affaire. On ne discute pas ici de la valeur de ces comportements, mais de leur existence et de leur extraordinaire résistance.

DEVELOPPEMENT COGNITIF ET EXPLICATIONS
SPONTANÉES EN DYNAMIQUE ÉLÉMENTAIRE

Le comportement des enfants confrontés à des situations physiques et leurs réponses à des questions portant sur ces situations évoluent, bien sûr, avec l'âge. Il est intéressant d'analyser ce développement en référence aux modes de raisonnement spontanés envisagés plus haut. On y retrouvera, de plus, des éléments analogues à ceux de l'évolution historique de la connaissance sur les mêmes points.

C'est dans l'oeuvre de J. Piaget et de ses nombreux collaborateurs, que l'on peut puiser les éléments d'information les plus riches. Dans son entreprise de déchiffrement des structures cognitives enfantines, J. Piaget a tenté de confronter les procédures opératoires (logico-mathématiques) dont dispose le sujet, et ses possibilités d'explication du monde physique "réel", que Piaget appelle la Causalité. Piaget souligne les interactions continues de ces deux lignes du développement cognitif, tout en montrant que l'on ne peut les réduire l'une à l'autre. Ainsi, à propos des opérations du sujet^{*} :

Expliquer un phénomène physique suppose certes l'emploi de telles opérations, car la recherche de la causalité en vient toujours à dépasser les observables et à recourir à des liaisons inférées, donc opératoires. Mais il s'y ajoute, et c'est là l'essentiel, les réponses de l'objet, car parler de causalité c'est supposer que les objets existent extérieurement à nous et qu'ils agissent les uns sur les autres indépendamment de nous : si le modèle causal adopté comporte une part inférentielle, c'est donc dans la seule intention d'atteindre ces propriétés de l'objet. Or celles-ci peuvent résister aussi bien que se plier au traitement opératoire utilisé par le sujet : d'où un développement des explications dont rien ne garantit d'avance qu'il présentera la même régularité ni la même simplicité relative que celui des opérations logico-mathématiques à elles seules.

^{*} Les explications causales, p. 7

Il n'est là encore, guère possible d'aborder ce débat dans son ensemble. On se bornera à rappeler les conclusions de Piaget quant aux notions fondamentales de la dynamique élémentaire, et à dégager du matériel expérimental correspondant, qui est considérable, quelques faits qui relèvent de l'évolution cognitive envisagée par Piaget, et d'autres qui sont hors de ce champ d'investigation. On s'efforcera de situer les uns et les autres par rapport au modèle formel orthodoxe de la dynamique Newtonnienne et aux comportements spontanés évoqués plus haut.

Cette approche volontairement limitée permet déjà de mesurer la distance évoquée par Piaget entre les explications physiques et les structures opératoires qu'elles mettent en oeuvre, et d'illustrer sur quelques points précis les conditions de résistance des objets physiques aux opérations spontanées du sujet. Il était plutôt question, jusqu'à maintenant, de la résistance du sujet aux nécessités de cohérence du modèle physique. Ces résistances, on s'en doute, se rejoignent. Elles ont, chez les enfants de 13-15 ans* une forme très proche de celles qu'on observe chez les étudiants et les adultes. Les comportements spontanés décrits plus haut constituent donc en fait les manifestations d'un système explicatif pratiquement stabilisé dès l'adolescence.

I. LE DEVELOPPEMENT DES NOTIONS DYNAMIQUES CHEZ L'ENFANT, SELON PIAGET

Plutôt qu'une longue paraphrase, on donnera ici quelques extraits de l'analyse Piagetienne. Chaque fait expérimental que cite Piaget est "mis en référence avec l'un des stades observés au cours du développement de la causalité. Or ces stades correspondent de façon assez générales à ceux des opérations** : stade préopératoire, I (4-6 ans), où les transformations ne sont envisagées que comme des actions propres du sujet ; stade de la pensée opératoire concrète, II (7-10 ans), où les opérations concrètes se stabilisent en un système structuré de transformations réversibles, mais restent limitées à l'organisation de données

* Age auquel Piaget les abandonne dans la jungle des connaissances avec une panoplie opératoire déclarée complète.

** Explications causales, p. 10.

immédiates ; enfin stade de la pensée formelle, hypothético-déductive en ce sens que "la déduction ne porte plus directement sur les réalités perçues mais sur des énoncés hypothétiques, c'est-à-dire sur les propositions formulant les hypothèses ou posant les données à titre de simples données indépendamment de leur caractère actuel"^{*}.

Les situations physiques auxquelles on fait allusion dans ce qui suit, sont, pour l'essentiel, des chocs entre des billes suspendues l'une à côté de l'autre, ou alignées sur une gouttière dont le profil est "en cuvette". Une bille, "active", est lâchée hors de sa position d'équilibre et l'on s'interroge sur la suite...

"Au niveau I A l'accent est mis sur les pouvoirs de la bille active, avec parfois mention des vitesses et même des poids mais indifférenciés au sein d'une "action" encore voisine de l'action propre.

...

Au niveau I B on assiste à des débuts notables de décentration. Pour les billes suspendues, les sujets insistent davantage sur les facteurs cinématiques et les poids (mais sans conservation) et conçoivent une succession d'actions sous la forme d'un enchaînement de transmissions immédiates externes".

Au stade II l'accent est mis sur la force, la vitesse, ou l'élan mais on envisage aussi le changement ou la genèse de telles grandeurs.

"... en II A cette force ou élan demeure intérieure au mouvement, en ce sens que celui-ci ou la vitesse constituent eux-mêmes la force, ce qu'on peut écrire sous la forme $f_{te} = p_e$ (où $p = mv$), tandis qu'en II B la force est différenciée et représente la cause du mouvement ou de ses changements, soit $f \rightarrow (dp)$.

...

Le niveau II B, qui marque des progrès notables dans les problèmes de direction (essais de coordinations entre les rotations et translations ou de covariations entre les angles d'incidence et de réflexion, etc.,
, en relation sans doute avec cette différenciation

* Logique de l'enfant et de l'adolescent, p. 220

** Les explications causales, p. 54-55

plus poussée de la dynamique et de la cinématique. Mais le fait que la force devienne cause du mouvement, tout en poussant le sujet à se poser une série de problèmes dynamiques nouveaux le conduit curieusement par cela même à certaines régressions apparentes. Par exemple du fait que le poids produit des effets variés et joue notamment un rôle dans la constitution de la verticale (ou de l'horizontalité de l'eau, etc.), son action ne se conserve plus selon les situations : il augmente avec la poussée ou lors d'une position vers le bas et diminue souvent avec la vitesse (ce que l'on peut écrire $m = p : v$).

Enfin au stade III les sujets admettent une accélération régulière des billes à la descente, tandis que disparaissent les difficultés signalées au niveau II B. On peut donc parler d'un début de la force $f = ma$."

La conclusion de Piaget est la suivante :

"L'évolution de la notion de force est donc assez curieuse en ce qu'elle ne procède pas par synthèse d'éléments préalables mais par différenciation et coordination de caractères initialement indifférenciés. En effet, le sujet ne part pas d'une notion de la masse qui serait donnée indépendamment de la force et par simple composition des quantités de matière, ni d'une notion du mouvement avec sa vitesse, sans référence aux forces, pour les synthétiser en une notion nouvelle. Au contraire, dans les stades de débuts, la masse possède déjà une force de même que le mouvement comme tel et c'est tardivement, une fois différenciés, qu'ils sont coordonnés en ce que l'on peut appeler une synthèse".

Telles sont donc les grandes lignes du développement des notions dynamiques envisagées par Piaget. On va examiner maintenant plus en détail quelques éléments de cette évolution, à partir du matériel expérimental cité par Piaget, mais sans nécessairement en retenir toujours les mêmes aspects ni en construire les mêmes interprétations.

II. QUELQUES ELEMENTS DE L'EVOLUTION DES NOTIONS DYNAMIQUES ELEMENTAIRES :

1. Force, cause liée à un effet

Génétiquement comme historiquement, la force intervient d'abord pour expliquer un mouvement, une transformation, ou son résultat bien

visible. On observe ainsi des situations où des enfants jusqu'à 9, 10, parfois 12 ans, ont besoin d'un effet visible pour admettre l'existence d'une force. Dans l'une des expériences de Piaget, des enfants sont interrogés à propos d'une situation physique simple* : un ou plusieurs poids suspendus (éventuellement par l'intermédiaire d'un fil de nylon) à un élastique, descendent et se stabilisent sur une position d'équilibre où l'élastique est étiré (l'existence de frottements comme l'absence de précisions ou de questions sur ce point gomme complètement le problème des oscillations). La première partie de l'interrogatoire porte sur des prévisions en fonction du nombre ou de la position des poids.

Puis

"Dans une seconde partie de l'interrogation, on passe à des questions plus générales : les poids tirent-ils tous également ? Un poids est-il une force et a-t-il toujours la même force, suspendu ou posé sur la table ? Les poids exercent-ils encore leur force quand le système est au repos (équilibre) ? L'élastique comporte-t-il une force et que fait-il ? Quelles sont les directions des forces des poids et de l'élastique ? Quels sont les rapports entre "tirer" et "retenir" ?, etc."

Voici quelques réponses du stade II.

(ANT, 9, 5)

"Tu sais ce que c'est la force ? - *Quand on tire on porte quelque chose de lourd, on a de la force.*

- Et le poids c'est une force ? - *Proportionnellement (= réciproquement) oui.* - Force de quoi faire ? - *De tirer.* - Et quand c'est arrêté ? - *Les poids ne peuvent pas tirer plus.* - Ils exercent toujours une force ? - *Non, ils la gardent mais ils ne continuent pas à la prendre (en descendant) ! Ils la gardent.* - Et sur la table le poids a une force ? - *Pas pour le moment mais si on l'accroche.* - Il y a une force là (poids posé sur la planche) ? - *Non, il est inerte, il ne fait rien."*

DAN(9,5) : ... (quand les poids sont sur la table)

"Ils n'ont pas la même force, ils sont moins attirés par la gravitation que quand ils sont suspendus".

BAU(10,10)

"Le poids posé sur la table n'a pas de force, mais, sus-

* La composition des forces, p. 8...

pendu au repos, *"oui, sinon la planche (planchette repère) remonterait"*. Lorsqu'on lui demande en quels sens sont orientées les forces en jeu dans les poids et l'élastique, il répond que *"l'élastique est tiré vers le bas et les poids tirent l'élastique"*, sans allusion au fait que celui-ci retient les poids. - Les poids tirent la même chose ou un tire plus ? - *Celui-ci (inférieur) tire celui-ci, celui-ci tire..."*, etc. "Le poids c'est une force ? - Non, parce que quand on le pose ça ne fait rien. Ce n'est que quand il est dans le vide... (que c'est une force)".

EVI (11,10)

... dit que le poids qui tire en descendant *"a de la force parce qu'il fait du travail"*, tandis qu'à l'état immobile il n'en a pas *"parce qu'il ne fait rien"*. Le poids couché n'est pas une force : *"il reste immobile, il ne peut rien faire"*, mais suspendu c'est *"une force de tirer"*. Après les constatations : *"Ca reste toujours pareil parce qu'un poids il a toujours le même poids. Qu'on les mette n'importe comment, ça ne change rien"*.

On le voit, il faut dans ces réponses un effet, la descente du poids qui tire ou l'extension finale de l'élastique, pour que le poids soit reconnu comme existant (ou agissant ?). Dans la même perspective, l'enfant pourra nier, ou plutôt passer spontanément sous silence l'existence d'une force qui n'a pas le sens de l'effet observé. Piaget relève, à cet égard, la réponse de BAU sur la réaction de l'élastique : *"l'élastique est tiré vers le bas et les poids tirent l'élastique"*.

Cette même situation, au stade III, donne lieu au contraire à des déclarations nettes d'indépendance entre le poids et l'existence d'un effet perceptible dans la situation immédiate, non sans quelques rechutes (voir TEU).

ALD (12,8)

"Et le poids sur la table il a toujours une force ?
- *Oui, il a une même force vers le sol*".

TEU (12,9)

"Le poids suspendu ou sur la table, ça change le poids ?
- Non." - Mais il en reste encore en partie à la force en mouvement : *"Si on met un poids dans la neige molle, on verrait quelque chose ? - Ca risque de s'enfoncer un peu. C'est une force alors ? - Si on le pose simplement, non, quand elle sera en train de faire le trou, oui"*. Par contre, pendu et immobile le poids continue de *"tirer"*. Direction des forces : l'élastique *"va en direction d'en bas tant qu'on met des poids"*, mais *"ça retient des deux côtés (forces opposées) quand vraiment il est tendu"*.

LEO (13,3)

"- Et posé sur la table ? - *J'sais pas. Suspendu ou sur une planche c'est toujours la même force, le même poids.* - Mais là il tire, et sur la table ? - *Il reste là, il ne fait rien mais c'est quand même de la force.*"
Direction des forces : la force des poids *"elle tire et là (l'élastique) il retient".*

L'évolution notée par Piaget est donc nette. On peut la formuler ainsi : le poids d'un corps, la réaction du ressort deviennent compatibles avec une situation d'équilibre ; "les forces, dit-il ailleurs, continuent d'exister à l'état immobile". Une étape est franchie dans la différenciation entre cause et effet, entre la force et ses manifestations cinématiques.

Piaget donne un autre exemple plus complexe d'évolution dans ce sens*, signalant que l'un des obstacles à la composition des forces, levé au stade III, est :

"La modification des forces selon qu'il y a mouvement ou repos : jusqu'au niveau II A inclusivement il faut plus de force pour retenir un wagon immobile sur une pente que pour le faire monter : en effet, tant qu'on le retient il a tendance à descendre, tandis que si on le monte il ne descend plus et cette tendance vers le bas étant supprimée il suffit d'une force moindre".

Le poids, puisqu'il s'agit encore de lui, s'affranchit donc, dans ce cas, de son mouvement, si l'on peut dire...

Ces transformations dans les réponses enfantines, qui étendent progressivement une notion de conservation acquise bien avant sur d'autres ensembles (longueur / déplacement, volume / forme, poids / forme) traduisent-elles une victoire complète, une différenciation totale entre force et mouvement, ou bien seulement des obstacles franchis plutôt que d'autres du même registre, qui demeurent, eux. Pourquoi alors ces décalages ? Il faudra revenir plus loin sur ces points fondamentaux.

* Les explications causales, p. 59.

2. Cause assimilée à l'objet, attribuée à l'objet

Le statut de la cause par rapport à l'objet, n'est pas non plus constitué rigide dès l'enfance.

Les plus jeunes identifient la cause à l'envie de l'objet, à son devoir, à sa place (on songe, évidemment, à Aristote), quand ce n'est pas tout simplement à l'objet lui-même : "La force, c'est la bille" dit KER (8,1)* (stade II), à deux reprises à propos de chocs entre billes. La cause peut apparaître non pas comme identique à l'objet, mais comme contenue par lui :

SEP (6,11) stade IB :

"D'où vient la force ? - *Elle est dedans.* - Toutes les billes ont la même force ? - *Non.* - Laquelle a plus de force ? - *Celle-là parce qu'elle est plus grosse elle a plus de place et parce qu'il y a plus de place on peut mettre plus de force.*"

MIC (5,6) stade IA , prévoit que la bille s'arrêtera au bas de la descente :

"Pourquoi ? - *Parce qu'elle n'est pas grande.* - Et celle-là (une grosse) ? - *Elle ira plus haut* parce qu'elle est grande. - Et celle-ci (moyenne) ? - *Elle s'arrêtera* (au bas de la pente). - Qu'est-ce que ça fait qu'elle soit grande ? - *...*" La grande arrivera jusqu'au haut de la piste raide .. Selon la constatation, *"des fois il y a de la force.* - Qu'est-ce que c'est ? - *Il y a quelque chose dedans, puis après ça roule et ça descend.*"

On l'aura remarqué dans ces deux dernières citations, ces forces internes à l'objet conduisent de façon fort cohérente à une notion proche de la "capacité impétussique" décrite plus haut par Galilée.

Ces formulations naïves disparaissent avec quelques années et les enfants du stade III s'expriment plus sobrement. Mais l'idée semble bien proche, et la cause attribuée à l'objet dans la quasi totalité des cas :

* La transmission des mouvements, p.113

** La formation de la notion de force, p. 101

*** La formation de la notion de force, p. 98.

"la force, l'élan, de la bille", "la bille a de la force, de l'élan"... De ce simple point de vue la distance parcourue entre les conceptions de MIC (5,6) et celle d'un enfant de 13 ans, voire d'un étudiant de 18 ans, n'apparaît pas très clairement. C'est sans doute la raison pour laquelle Piaget n'a pas développé cet aspect de la question. C'est en effet dans les propriétés attribuées elles-mêmes à la force et au mouvement que l'on discerne le plus nettement une évolution.

Les progrès de la conservation du poids vis-à-vis du mouvement mis en relief par Piaget et signalés plus haut constituent déjà un exemple. En voici d'autres.

3. Le mouvement retrouvé : l'accélération

La recherche d'une cause au mouvement, et son attribution à l'objet lui-même conduisent, les exemples historiques en témoignent (cf. p.159) à des circuits néfastes dont le phénomène de départ - le mouvement - sort bien malmené. Ainsi, toujours à propos de chocs de billes suspendues : une bille lâchée en position haute accélère et en heurte d'autres immobiles à l'équilibre. La cause de ce qui va se passer ensuite c'est, bien sûr, la "force de cette bille" active. D'où la bille active tient-elle sa force ? - De sa vitesse, de son élan ou, pour revenir à la source, du fait qu'on l'a lâchée en haut (il s'agit donc de ce que nous appellerons son *Energie Potentielle initiale*). La cause, la force, est liée à la hauteur. Une assimilation de plus, entre cause et effet, entre force et vitesse, et voici le résultat*.

IVA (5,8) stade Ia

"Où elle roule le plus vite - en haut" **

GUI (7,6) stade IIa

"Où c'est le plus vite - en haut". ***

* C'est une interprétation personnelle

** La formation de la notion de force, p.60

*** La formation de la notion de force, P.70.

MET (9,2) stade IIB

*"Si elle est plus haute elle prend plus d'élan.
- Qu'est-ce que c'est ? - Vite, plus vite, ça fait
un plus grand choc. - D'où vient l'élan plus grand ?
- Le vent, non la vitesse de la boule. - D'où elle
vient ? - De l'élan. Il y a plus d'élan en haut, là
(près des boules) ça fait moins. Ici (à mi-chemin du
haut et des boules) il y a une bonne différence. Ça
va mieux. - Cette différence fait quoi ? - Plus d'élan,
ça va plus vite et ça peut taper plus fort".
Pour deux billes : "D'où vient cet élan ? - De la
vitesse. - Et la vitesse ? - Ça dépend de la boule
(matière, poids ou grosseur ?). - Où la vitesse est
la plus grande ? - (Montre le haut) - D'où vient-elle ?
- Je ne peux pas dire. Peut-être la vitesse vient de
l'élan". **

Les enfants du stade III n'ont pas ce comportement. Les méandres explicatifs, les assimilations fluctuantes entre force, élan et vitesse abondent encore, on y reviendra, mais aucun raisonnement n'a le droit cette fois de contredire l'observation suivante : la bille va de plus en plus vite en descendant et de moins en moins vite en remontant. Ce fait ressort très nettement des protocoles cités par Piaget. Il rejoint de plus, et de façon frappante, ce que l'on a remarqué plus haut (p. 163) sur l'étape historique incarnée par des Gassendi, Galilée, Hooke... qui surent préparer la voie à la synthèse Newtonnienne en renonçant provisoirement à l'interprétation dynamique, du moins en sachant considérer le mouvement sans faire intervenir les causes, ou peut-être même malgré ces causes.

Dans ces mêmes dialogues, J. Piaget note essentiellement les nuances introduites par certains enfants entre l'élan-vitesse et l'élan-prise de vitesse, et souligne la prise en compte d'un facteur de type accélération :

PIO (10,8)

"La rouge ça pousse, la poussée c'est le chemin qu'elle prend en arrivant avec sa force, ... - D'où vient la poussée ? - En prenant l'élan. - Comment elle l'a pris ? - En prenant de la vitesse. - L'élan c'est la vitesse ? - Non. La vitesse c'est aller vite, l'élan c'est quand

* La Transmission des mouvements, p.81

** La formation de la notion de force, p.90...

on court un moment pour aller plus vite. La poussée c'est quand elle pousse. - La vitesse est toujours la même ? - Non, elle est plus forte en arrivant. - Et la plus petite ? - Au début. - Et la force ? - Il y a plus de force quand il y a plus de vitesse. - Et l'élan ? - Comme la vitesse (dessin d'accélération)."

MEG (10,6)

"Mêmes réactions. "La bille a plus de poids (position du fil au départ et descente) ? - Non, c'est un élan qui fait plus lourd. - Qu'est-ce que c'est l'élan ? - C'est la vitesse. Non, c'est le démarrage, la vitesse c'est au bout d'un moment. - Et le poids si on mettait sur une balance ? - C'est toujours le même poids". Etc."

BIA (15,11)

"La force se transmet de bille à bille et la dernière va partir. - La force vient d'où ? - De la différence du tube. Elle prend de l'élan, de la vitesse. - Vous pouvez distinguer ? - La force s'accroît avec la vitesse, l'élan c'est le point de départ de la vitesse. - Et qu'est-ce qui se transmet ici ? - La vitesse transmet la force et l'élan automatiquement. - La force passe où ? - Dans l'axe de la bille".

Mais selon J. Piaget, ces réponses ne traduisent pas seulement l'acquisition d'une première notion d'accélération. Pour lui cette acquisition, jointe à celle de l'invariance du poids, manifeste un début de constitution de la notion de force.

Là encore se pose une question sur laquelle on reviendra : incontestablement une étape est franchie, des éléments essentiels à la notion de force se mettent en place. Mais s'agit-il d'un préalable nécessaire, en ce sens qu'une réalité cinématique (même si elle se formule en termes dynamiques) est prise en compte, ou bien est-on réellement au coeur du problème ? Avant de formuler des hypothèses, il faut encore envisager quelques éléments de l'évolution des enfants.

4. Prévisions de mouvements

4.1. Descente et Remontée d'une bille sur une piste de pente et longueur variables.

Un autre exemple d'acquisition de ce stade III est l'aptitude des enfants à dégager le paramètre pertinent : la hauteur de départ, pour prévoir le point d'arrivée d'une bille lancée sur un toboggan "en cuvette"* . Alors que les plus jeunes s'attachent à la seule pente ou à la seule longueur des pistes, les enfants du stade III isolent de façon stable le paramètre hauteur, sachant concilier celui-ci avec les transformations des deux autres. Une telle acquisition est nette et stable. Piaget met non moins nettement en évidence la coïncidence d'une telle évolution et l'aptitude opératoire correspondant à ce stade, qui consiste à concilier deux transformations en une structure simple.

4.2. Mouvements inertiels

Là encore, Piaget met en évidence une évolution qu'il résume ainsi : **

"La R 70 a porté sur les questions de savoir 1) De quel côté tombera l'enfant debout sur un tapis si on tire celui-ci dans une direction donnée ou 2) Une poupée debout dans un carton ; 3) Où il faut placer un personnage dans un wagon pour qu'il ne tombe pas au départ ; 4) Ce qu'il adviendra d'une bille à l'arrière d'un wagon lorsque celui-ci partira, puis lorsqu'il s'arrêtera ; 5) Idem si la bille est placée au milieu. Au stade I les questions 1 et 2 ne sont pas mieux résolues que les suivantes. Au stade II elles le sont, y compris en général 3, mais les questions 4 et 5 donnent lieu à une prévision fautive et assez systématique : la bille partira en même temps que le wagon et dans le même sens que lui, par transmission immédiate de son mouvement (et sans que le sujet se doute qu'ainsi la bille aurait une vitesse double de celle du wagon). Enfin au stade III les sujets admettent qu'au départ les billes vont dans le sens contraire (et même restent sur place par rapport aux références extérieures) et qu'à l'arrêt elles héritent par transmission du mouvement du wagon et partent en avant."

Et sur la "force centrifuge" :

"La R 71, concernant la force centrifuge a fourni des

* La formation de la notion de force, p.113

** Les explications causales, p.86.

indications sur la direction tangentielle du départ des mobiles sur un disque en rotation. Au stade I les trajectoires sont quelconques, puis orientées de façon circulaire sur le plateau lui-même sans prévision de chutes (ce qui est encore fréquent à 7 ans et au-delà). Au stade II, la chute est prévue mais la direction de départ est prévue perpendiculaire au bord du plateau (encore pour le quart ou le tiers du sujets à 9-10 ans et parfois au-delà), en arrière ou un peu en avant. Au stade III enfin la direction de départ est tangentielle. Les questions portant sur un rail en montagne russe avec départ obligé d'une bille lors d'une incurvation brusque, ou en trajet horizontal mais avec un tournant en épingle donnent les mêmes résultats."

Ceci est encore une occasion pour remarquer, avec Piaget, que de tels progrès, qui supposent la prise en compte simultanée de deux systèmes de référence, ne peuvent intervenir qu'une fois constituées les possibilités opératoires du stade III.

4.3. Caractères généraux de l'évolution des notions dynamiques chez les enfants

De cet ensemble de faits, et d'interprétations, on peut tenter de dégager quelques fils directeurs.

Sans doute faut-il commencer par les deux derniers exemples cités, qui font apparaître simplement (et c'est la seule raison pour laquelle on ne les a pas développés davantage) l'apport considérable de la démarche Piagetienne : l'enfant ne devient capable de décrire d'abord puis de prévoir certains faits physiques que lorsqu'il a atteint un niveau opératoire correspondant à la structure de ces faits. Les exemples cités ici ne sont évidemment pas les seuls pour illustrer cette nécessité désormais incontestable. On peut évoquer encore les liens mis en évidence par Piaget, entre le développement de la transitivité et l'analyse des chocs sur des systèmes de billes^{*}. Ce minimum opératoire indispensable est donc l'un des facteurs essentiels du développement cognitif.

* La transmission des mouvements.

Mais ces deux derniers exemples nous suggèrent d'autres remarques :

L'enfant qui élabore une prévision juste pour l'une de ces situations physiques a suivi un itinéraire complexe. Ses propres représentations, issues de certains éléments de son expérience vécue, n'ont pas toujours été compatibles avec toutes les données de cette expérience, en particulier avec celles qu'on lui présente lorsqu'on l'interroge. Des réajustements successifs se sont effectués, dans la mesure de ses possibilités opératoires, pour aboutir à une compatibilité acceptable entre ses prévisions et les "réponses de l'objet". On voit mal comment l'enfant pourrait élaborer une prévision correcte sans référence à des expériences vécues tout à fait analogues à celles sur lesquelles on l'interroge : comment "prévoir" autrement que la bille va remonter sur le toboggan à son altitude de départ ? Quelle nécessité logique fait qu'une bille part tangentiellement dans une courbe ?

Or précisément les situations physiques que l'on présente dans ces exemples sont susceptibles d'être expérimentées relativement couramment du moins sous des formes très analogues. Tout enfant a fait rouler des billes, est monté dans un train, a tiré un petit copain sur un tapis, a renversé la bouteille de vin en tirant sur la nappe, est monté dans un manège. De plus les questions que l'on pose portent sur des données directement* accessibles perceptivement : longueurs, hauteur, sens d'un mouvement... Ceci nous semble expliquer la netteté et la stabilité des progrès enregistrés sur ces prévisions de mouvements.

* Cf. note p. 190

Mais il faut bien remarquer que cela n'est pas nécessairement le cas pour tous les aspects du modèle formel de la physique. Il y a une correspondance plus ou moins simple, selon les concepts, les faits physiques envisagés, entre le modèle formel interprétatif et la réalité physique telle que la perçoit tout un chacun. Et il n'est pas du tout équivalent de savoir constater, reconnaître un fait physique particulier à travers un code de lecture constitué d'éléments directement* accessibles (longueur, direction, vitesse...), ou bien de mettre en relation des faits physiques très différents en apparence grâce à des concepts unificateurs tels que Force (au sens de Newton), Energie Potentielle... qui ne se lisent pas de façon immédiate* - c'est le moins que l'on puisse dire - dans le réel.

De ce point de vue, tous les aspects de l'évolution des enfants cités plus haut ne doivent pas être mis sur le même plan.

. Ainsi le fait que les enfants du stade III observent et savent prédire l'accélération d'une bille qui descend sur un toboggan peut être rapproché des exemples d'anticipation que l'on vient de discuter : (un peu) mieux dégagés de l'animisme initial, capables de prendre en compte une succession temporelle d'événements, les sujets savent "voir" l'accélération et en faire état, malgré les cycles hasardeux de leurs "explications" dynamiques. Cette acquisition, là encore, est stable car quotidiennement et directement confirmée par l'expérience.

. Le statut de la conservation du poids est déjà plus délicat à situer : Relativement à la longueur du fil inextensible qui suspend un tel poids à un élastique**, on peut encore penser qu'il s'agit, en

* Ce terme ne doit pas laisser oublier que toute "lecture" du réel suppose la construction de structures cognitives plus ou moins élaborées. Il est à prendre dans un sens relatif.

** La composition des Forces et le problème des vecteurs, p.7...

partie, d'une conservation reconnue à un indice physique : l'élastique s'étire toujours de la même façon. Mais dans le cas de la conservation du poids vis-à-vis du mouvement, la constatation directe est impossible. Il faut une opération mentale : je prends ce poids, je l'arrête, je le pèse, c'est toujours le même objet, c'est toujours le même poids. Conforme au consensus général, qui considère le poids comme un attribut de l'objet, cette démarche n'a rien de logiquement impératif. Si, dans ce cas, l'enfant n'a aucun moyen logique de s'assurer de la conservation du poids, il n'a, non plus, aucun moyen physique de la vérifier. On ne sera donc pas surpris de constater, plus loin, que cette acquisition n'est pas installée de manière bien stable.

On va montrer enfin, dans ce qui suit, ce qu'il en est des explications dynamiques construites par les enfants. Celles-ci interviennent à propos d'expériences physiques réelles mais portent sur des notions dynamiques non directement accessibles à l'évaluation. De ce fait, le développement de ces explications n'a pas du tout les caractéristiques notées plus haut à propos des prévisions de mouvement.

III. LES EXPLICATIONS DYNAMIQUES DES ENFANTS

1. Les constantes

Pour l'essentiel, en effet, le système explicatif des enfants en matière de dynamique ne se modifie guère. Il s'adjoint les possibilités opératoires de plus en plus élaborées, transitivité, inversion, réciprocité, compensation, il s'adapte de ce fait de mieux en mieux au réel directement perçu mais en cédant le moins de terrain possible sur le fond. Le réel n'imposant pas grand chose, finalement, quant à des notions non directement accessibles, et à but essentiellement explicatif, on observe des modes de raisonnement relativement stables. Il faudra une toute autre démarche pour ébranler l'édifice ainsi constitué.

Lorsque l'enfant établit une relation entre l'altitude de départ et l'altitude d'arrivée d'une bille sur un toboggan, il

n'explique rien au sens du physicien : il ne peut pas inclure ce fait dans un système d'autres faits dont il donne un modèle restreint, cohérent et stable (car en fait d'explication, personne ne sait rien faire de mieux...). Mais il est le seul à ne pas le savoir. Lui, dès le départ, a besoin de causes, exhibe des causes. On a vu le statut de ces causes se modifier en partie depuis "la force, c'est la bille" de KER, jusqu'aux innombrables "force de la bille" du stade III. On a vu le poids s'affranchir, dans une certaine mesure, de l'effet et du mouvement. Mais ce sont des enfants du stade III qui s'expriment ainsi* (Piaget qualifie, de ce fait, leur niveau d' "intermédiaire") :

ALD (10,6)

"L'élan augmente à la descente et "se perd de plus en plus à cause du poids" à la montée. S'il augmente à la descente ainsi que la vitesse, c'est que le poids fait de même : "Quand on laisse tomber quelque chose d'une tour de 30 m, il y a toujours des kilos de plus quand ça tombe", mais pour la bille qui descend Ald dit ensuite plus prudemment : "Le poids devient comme un peu plus lourd", puis : "Non, c'est toujours le même poids, la bille, mais quand elle descend elle prend plus de poids : mais le poids ne change pas, la vitesse change. Avec l'élan elle descend plus vite. C'est toujours le même poids mais ça descend plus vite."

ARC (11,11)

L'élan c'est "quand on lâche, c'est la vitesse qu'elle a pris au départ : elle a pris de l'élan". Quant au poids, Arc est en une situation intermédiaire intéressante. On lui demande si la bille garde son poids en mouvement : "Oui. - Il n'y a pas plus ou moins de poids ? - Comment, le poids, la lourdeur ? - Ca pourrait être autre chose ? - Le poids de la vitesse. - Quelle est ton idée ? - On pourrait imaginer. A la pente on imagine qu'elle a plus de poids que là. - Mais ce n'est pas vrai ? - On pourrait penser. Oui, ça peut être juste. Oui c'est juste que là (descente) elle a plus de poids que là..."

Et si le poids, finalement, se conserve, rien ne dit comment il se situe par rapport à la "force".

* La formation de la notion de force, p.89.

Quant à la "force", elle est bien loin, au stade III, d'être affranchie du mouvement. Equivalente tour à tour à l'élan, à une puissance, à ce que nous appellerions l'énergie cinétique, à ce que nous appellerions l'énergie potentielle, à la vitesse enfin, bien souvent explicitement proportionnelle à cette dernière, elle constitue une sorte de complexe causal attribué à l'objet (force de ...), indifférencié et mal situé dans le temps, depuis le stade I jusqu'au stade III, où elle voisine parfois avec un poids (force exercée sur...) co-responsable du mouvement. Plutôt que de redétailler chacun de ces points, déjà longuement décrits dans d'autres chapîtres, laissons le lecteur en reconnaître, à longueur de citations*, les éléments :

Stade I

VIA (6,6)

"- Elle va entrer plus fort dedans parce qu'elle a roulé plus fort".

- Ca veut dire quoi ?

- Plus vite, ça fait du courant".

(T.M. p.75)

Stade II

DID (10,10)

"- La force et la poussée, c'est la même chose ?

- La poussée, c'est quand une boule arrive, qu'elle fait pousser justement la dernière. Et puis la force c'est la puissance de la bille".

(T.M. p.79)

BON (8,11)

"- Où c'est le moins vite ?

- Au début de la montée.

- L'élan c'est quoi ?

- C'est de la force.

- Quand elle a de la force ?

- Quand on la lâche."

(F. p.72)

WEB (8,4)

"- L'élan c'est comme une force qui pousse la bille à la descente pour la faire remonter".

(F. p.72)

PEL (8,5)

"- Quand on va très très vite on a une puissance".

(F.p.70)

PER (7,8)

"- Le bousclement et la force, c'est la même chose ?

- Pas tout à fait. La force c'est tout ce qu'on a, tout ce qu'on peut faire. Le bousclement, c'est pas pareil".

(T.M. p.76)

* F : la formation de la notion de force.

T.M. : la transmission des mouvements.

Les commentaires cités sont de Piaget.

GUY (7;1)

"prévoit la remontée parce que la descente *"ça fait de la force"* et après une prévision exacte *"elle a moins de force parce qu'elle est partie de moins haut"*. (T.M.p.104)

KER (8,1)

"- D'où vient la force ? - De la bille qui a roulé parce que *c'est un choc*. - Un choc on le voit ? - On le voit quand la bille part. - Et là force ? - La force *c'est la bille ; c'est lourd et ça donne de la force*. - La force et le choc *c'est la même chose* ? - Le choc *c'est quand on pousse brusquement et la force c'est un peu... lourd*." (T.M.p.113)

Stade III (cas dits "francs" par Piaget)

ONI (11,11)

"La bille A *"poussera celle-là et elle donnera aux autres sa force*. - Pourquoi *l'avant-dernière ne part pas* ? - Elle a la dernière qui l'empêche : elle a donné sa force à celle-là et elle n'avait plus la force de partir". (T.M.p.120)

TIG (12 ans)

"Au fur et à mesure, la force de la bille se perd et elle se propage en se touchant". - (A) a la même force que (C) ? - (A) a plus de force. Non, je crois qu'il y a la même force et même (C) aurait plus de force que (A), ça gagne de la vitesse". (T.M.p.120)

RAU (12,5)

"Elle aura pris autant de force en descendant qu'elle en aura perdu en montant". (F. p.130)

MOJ (10,6)

"La force vient de l'élan. Plus il y a d'élan, plus elle (l'active) a de force. - Et l'élan ? - Il y a de l'élan quand *c'est plus haut*". "Le poids ne change pas. - Qu'est-ce qui change ? - La vitesse, l'élan". (F. p.89)

LAD (10,6)

"Et avec dix billes ? - La même distance... un peu moins de force : arrivée là, il n'y aura pas très beaucoup de puissance, puis elle ira à peu près à la même distance... un peu moins. (Constatation). - Alors ça donne la même force. C'est drôle en tout cas." (T.M.p.119)

ALD (10,6)

"C'est une sorte de relais. Quand la rouge (active) descend, c'est le poids de la bleue (passive) qui s'oppose et la bleue prend le relais. - Pourquoi la rouge ne suit pas la bleue ? - Parce que c'est une sorte d'obstacle,

la bleue, la rouge arrive sur l'obstacle, ça lui fait couper l'élan, perdre l'élan et la bleue monte". Même explication pour trois et neuf billes. "L'élan il se passe dans toutes les billes" mais "chaque fois quand une bille pousse l'autre, l'élan se perd (pour celle qui pousse), une partie de l'élan se perd". (T.M.p.90)

BER (13,2)

"Il y a le poids des billes (suivantes) qui les empêche (les précédentes) de bouger, il y a une après et une avant, il y a quelques-unes après alors ça peut pas bouger... la blanche a transmis la force et n'est pas montée", "la rouge en poussant la bleue a perdu une partie de sa force", etc... (T.M.p.90)

GRA (13,5)

"Quand elles s'entrechoquent il y a de la force qui se perd. - Où ? - Là-dedans, dans les autres billes (suivantes)". (T.M.p.90)

FOR (11,2)

"La bille unique arrivera à la même hauteur mais "c'est pas naturel qu'elle monte, mais elle a tellement de force, de vitesse, qu'elle peut remonter. - D'où vient cette vitesse ? - Quand elle descend ça fait comme une boule de neige (accélération nette sur le dessin jusqu'au milieu). - Et la force ? - Elle a de plus en plus de force quand elle descend, parce que ça va de plus en plus vite".

TAZ (11,11)...

"formule une distinction précise entre l'élan et la vitesse. La vitesse croît régulièrement à la descente jusque près du milieu où la courbe tend vers l'horizontale. Par contre l'élan c'est l'accélération elle-même : "C'est quand on a quelque chose qui va toujours plus vite", de telle sorte qu'il est figuré constant sur le dessin : "oui c'est le même élan", sauf sa diminution à la montée ; quant à la force c'est la poussée résultant de cet élan : "La bille a aussi de la force ? - Oui, quand elle descend, si je la recevrais sur le bras, ça ferait mal. Etant donné qu'elle a un élan (donc une accélération), plus ça va vite et plus ça fait mal". (T.M.p.91)

SEN (11,6) ...

"commence par indiquer une diminution progressive de vitesse à cause de la pente en arc de cercle puis se corrige en admettant que la vitesse s'accroît et que c'est l'élan qui diminue : "Il y a beaucoup d'élan en haut puis toujours moins. - Alors la vitesse augmente et l'élan diminue ? - (Oui), parce que c'est penché (en haut) et que ça veut descendre".

TRI (12,2)

"L'élan c'est la durée, la longueur de la pente (ce qu'il

marque sur son dessin par une accélération très régulière en 12 longueurs croissantes) ; la force c'est... plus c'est lourd, plus ça a de force. - Et l'élan on le prend alors avec la longueur ? - Oui. - Et la force ? - Avec la vitesse que ça a, l'élan. Plus l'élan est grand plus il y a de force. - Et le poids ? - Plus la bille est lourde plus elle va vite. - Le poids change avec la descente ? - Ah ! non c'est la même chose partout." A propos de 3/2 il revient sur ces deux composantes : "La force vient du poids, elle vient aussi de l'élan. Plus l'élan est grand, plus ça va vite et plus il y a de force". (T.M.p.91)

STE (12,8)

"..ne parle que de poids, élan et force mais pas de vitesse sauf une seule fois (sur 6 pages) : "Il vient d'où l'élan ... ? - Du poids. C'est le poids qui donne l'élan. - Et quand elle s'arrête ? - Elle n'a plus d'élan, la vitesse diminue". Pour 9/2 prévision juste "parce qu'elles sont deux et qu'elles ont plus de poids ensemble. Elles ont un double élan". "On peut toujours savoir combien de billes vont partir ? - Oui, si toutes les billes ont le même poids. - Et ici 9/4 ? - Quatre partiront. - Et la blanche ? - Elle reste au milieu. Pourquoi ? - Parce qu'il y a quatre poids. Ce serait en quelque sorte injuste qu'il y en ait une de plus qui parte : ça ferait trop lourd." A la fin : "C'est le poids qui donne la force" mais ensuite la force vient "de l'élan. - Et l'élan ? - Du poids de la bille. - Plus la bille est grosse, plus elle a d'élan ? - Oui. - Et la force ? - La bille a de la force pour taper contre les autres billes, ce n'est pas de l'élan. - Alors quand a-t-elle de l'élan ? - Quand elle commence à partir. - Et quand a-t-elle de la force ? - Au moment qu'elle part elle a automatiquement de la force".

BAL (13,6) ...

"dessine un élan qui croît jusqu'à mi-hauteur de la descente pour diminuer ensuite tandis que la vitesse augmente jusqu'en bas, parce que "quand elle commence à rouler il y a un élan, ensuite c'est plein d'élan puis elle prend de la vitesse (qui dérive donc de l'élan). - Comment est-elle au milieu ? - Elle est au sommet de sa vitesse." Le poids est constant et "se rapporte à son volume". Quant à la force, "toute la force qu'elles avaient en descendant elles vont l'employer à se cogner", et la transmission est due à ce que "la force traverse" les billes".

TER (13,2) ...

"pense aussi que "la vitesse c'est à peu près la même chose que la force ; la vitesse c'est plus long, tandis que la force c'est un petit moment", mais elles augmentent cependant régulièrement toutes deux à la descente.

"Qu'est-ce qui peut augmenter la force ? - *C'est son poids (de la bille) et la descente, puisque plus c'est lourd plus ça descendra vite*". Mais pour chaque bille le poids est constant".

GIL (13,0) ...

"figure une belle accélération pour la vitesse et un accroissement également régulier de l'élan : "D'où elle a cet élan ? - *Plus elle descend, plus elle va vite.* - C'est la vitesse qui donne l'élan ? - *Ou l'élan qui donne la vitesse ! Si on n'a pas de vitesse on n'a pas d'élan et si on n'a pas d'élan on n'a pas de vitesse.*" L'élan est nécessaire "*parce qu'on ne peut pas partir tout de suite d'un seul coup*" et se confond donc avec l'accélération. Quant à la force, Gil parle de "*propulsion*" et fait alors intervenir le poids : "*L'élan, la vitesse et la force ce sont trois choses différentes qui vont ensemble.* - Comment elles vont ensemble ? - *Si je reçois un poids sur la tête... je ne sais pas comment l'expliquer*", mais, Gil précise : "*Justement, cette force se propulse de l'une à l'autre ; le poids (de l'active) se retrouve dans celle-ci (dernière passive)*".

(T.M.p.92)

2. Constitution et stabilisation du système explicatif en dynamique

Les enfants du stade III n'ont pas acquis dans leurs explications, on vient de le constater, la même sûreté que dans leurs prévisions. Ces prévisions, réajustées, n'ont nullement remis en cause l'amalgame dynamique si souvent, pourtant, générateur de contradictions verbales. Si ce n'est plus la pente du toboggan qui donne de la force à la bille, mais l'altitude de départ, cela ne change rien au fait que la bille a une force, qu'elle en gagne, qu'elle en perd, et que la "force vient du poids ; elle vient aussi de l'élan..." (TRI 12,2), etc... STE, qui sait prédire combien de billes partiront en fonction du nombre de billes "actives", se perd dans les explications cycliques habituelles : c'est le poids qui donne la force... la force vient de l'élan... l'élan vient du poids... la bille a de la force pour taper les autres billes, ce n'est pas de l'élan... au moment qu'elle part elle a automatiquement de la force... GIL (13,0), qui sait figurer par un dessin l'accélération

du mobile, finit par dire que le poids de la bille active se retrouve dans la dernière bille passive.

Ces quelques exemples redisent combien la simple contemplation du monde physique réel est peu éclairante quant aux concepts impliqués dans la relation de Newton. Mais les modes d'explications que l'on observe, et que les faits physiques ne suffisent pas à rendre conforme au modèle formel, d'où proviennent-ils eux-mêmes, et comment se stabilisent-ils ?

L'analyse qui vient d'être esquissée porte à croire que les germes de ce système sont très précoces. Sans doute n'est-il guère besoin de démontrer que les réalités physiques, mais aussi physiologiques, ne sont pas étrangères à l'affaire. L'expérience de l'effort musculaire associé au déplacement d'un objet n'est évidemment pas neutre et intervient si tôt ! De même, au cours d'un choc, l'importance des effets (la "force" du choc) s'évalue en fonction du mouvement des projectiles : "plus ça va vite, plus ça fait mal" dit TAZ (11,11), "si je reçois un poids sur la tête... je ne sais pas comment l'expliquer" avoue Gil (13,0).

Des impressions physiologiques aussi élémentaires associent toutes élan, vitesse et force. Comment douter que ces grandeurs "vont ensemble" ? Dans une autre expérience (J. Maury, E. Saltiel, L. Viennot, 1977), sur des enfants de 11 ans, on a pu observer à quel point la vitesse d'un objet qu'ils déplaçaient était associée à leur geste : les sujets refusaient de considérer cette vitesse dans un autre repère (~~pourtant rassurant : la pièce~~) ~~que le leur~~ (~~pourtant mobile : un~~ fauteuil roulant).

Comment maintenant comprendre que cette association entre force (et notions dynamiques associées) d'une part, mouvement et vitesse de l'autre, survive aussi bien à une expérience plus complète du monde physique ?

Le fait essentiel a déjà été souligné : dès qu'il y a mouvement, la force, la puissance, l'élan, ne sont pas accessibles directement à l'expérience, autrement, précisément, qu'à travers leurs effets. Aucun fait physique ne viendra directement contredire une explication en

terme de force. Les seuls démentis porteront sur des mouvements incorrectement prédits.

Le seul problème est donc d'adapter les forces à leurs effets, ce dont toute cette étude donne de nombreux exemples : il suffit que la force vienne de la hauteur et non de la pente, qu'elle se proportionne à la vitesse, qu'elle s'épuise ou s'en adjoigne une autre, qu'elle passe dans l'autre bille. Explications ad hoc, au coup par coup, dont le seul tort est de ne pas se concilier en un modèle totalement compact et cohérent. Mais d'une part le système intuitif comporte un certain degré de cohérence, d'autre part l'incohérence n'apparaît que si l'on s'en soucie. Or la vie courante se contente très bien d'explications ad hoc : les effets sont connus d'avance. Dès lors chaque fait physique ainsi "expliqué" renforce le système explicatif intuitif au lieu de le remettre en cause. C'est ainsi que ce système se trouve pratiquement stabilisé dès l'adolescence sous une forme très proche de ce que l'on observe chez les étudiants et les adultes.

Raisonnements spontanés dans l'environnement culturel actuel

Il reste, pour se convaincre de la généralité des processus relevés jusqu'ici, à en observer les traces un peu partout dans la littérature actuelle sur toutes sortes de sujets. Le matériel écrit sera cité de préférence aux commentaires entendus dans le métro ou dans les queues de remonte-pente, et ceci pour une seule raison : les pièces à conviction sont faciles à exhiber. Cet aspect mis à part, les quelques textes cités ici ne doivent être considérés que comme les témoins d'une pratique extrêmement répandue chez les adultes, dans toutes leurs formes d'expression. Les travaux de l'INFA déjà évoqués^{*} explorent ces comportements dans le cadre d'expériences spécifiques : il s'agira ici de textes glanés dans des ouvrages où l'auteur s'exprime en toute liberté.

Afin d'éviter les répétitions lassantes, on se bornera à propos de chaque texte, à signaler rapidement ses caractéristiques essentielles et à renvoyer le lecteur aux comportements du même type décrits dans ce qui précède.

Questions d'un interrogatoire Piagetien

La Composition des Forces, p. 9.

Style personnel ou adaptation à l'auditoire enfantin ? La question se pose. Quoi qu'il en soit, il faut remarquer que la forme de cette interrogation n'est pas quelconque :

"Dans une seconde partie de l'interrogation, on passe à des questions plus générales : les poids tirent-ils tous également ? Un poids est-il une force et a-t-il toujours la même force, suspendu ou posé sur la table ? Les poids exercent-ils encore leur force quand le système est au repos (équilibre) ? L'élastique comporte-t-il une force et que fait-il ? Quelles sont les directions des forces des poids et de l'élastique ? Quels sont les rapports entre "tirer" et "retenir" ?, etc."

* J. Migne (1970)

Points remarquables :

- identification ("un poids est-il une force ?")
ou attribution ("a-t-il toujours la même force ?" ; "l'élastique comporte-t-il une force ?") de la force à l'objet
(cf. p.44,90,154,183,193)

- corrélativement aucune mention des points d'applications des forces : la question "qu'est-ce qui agit sur quoi ?" est complètement absente, d'où toute l'ambiguïté de la question "un poids a-t-il toujours la même force suspendu ou posé sur la table ?".

Incidence de la vitesse sur les accidents de la route

"Au fil de la semaine", Le Monde, avril 1976
(texte relevé par F. Halbwachs)

Il est question des divers facteurs intervenant dans les accidents de la route...

Toute cette litanie, dont chaque verset a été cent fois psalmodié, n'est certes pas inutile. Mais l'essentiel n'est pas là, et on l'a bien vu d'ailleurs, puisque c'est sur la limitation de vitesse que la discussion a été la plus acharnée, que le seul amendement important a été voté à l'arraché et que finalement le Conseil s'est partagé. Les syndicats et les associations familiales souhaitent préconiser, ou au moins permettre, un abaissement des vitesses maximales actuellement autorisées, tandis que les industriels et artisans des secteurs public et privé, qui l'ont d'ailleurs emporté, entendaient bien qu'une telle mesure soit empêchée et même que, le cas échéant, les maxima imposés puissent être relevés.

*
x
x

$E_c = \frac{1}{2} M V^2$: l'équation signifie en pratique que l'arrêt

instantané d'un véhicule roulant à 25 km/h. équivaut à une chute verticale d'une hauteur de 2,40 m. A 100 km/h., on tombe de 40 mètres, c'est-à-dire du onzième étage ; à 150 km/h., de 90 mètres, ou si l'on veut du vingt-sixième étage. Dans le corps du conducteur ou de ses passagers, le foie, qui pèse en moyenne 1,700 kg, atteint, à 80 km/h., un poids apparent de 38 kg, et à 120 km/h., de 57 kilos.

Toutes les statistiques produites — on fera grâce ici au lecteur des chiffres, mais qu'il fasse en retour à l'auteur la grâce de le croire — montrent d'une part que la limitation de la vitesse entraîne une diminution quasi proportionnelle du nombre et de la gravité des accidents. Si on considère que l'excès de vitesse est responsable directement d'un accident sur quatre en moyenne et les fautes de conduite d'un sur deux (l'alcool étant responsable d'une de ces fautes sur cinq), force est d'admettre que l'inattention, l'erreur d'évaluation, le mauvais réflexe et toute autre forme de déficience du conducteur comportent des conséquences d'autant moins graves que le véhicule roule moins vite. A la limite, la vitesse peut être aussi rendue responsable, sinon de trois accidents sur quatre, du moins de près de trois morts sur quatre, de trois handicapés sur quatre.

Le texte examine l'équivalence des effets entre chocs sur un obstacle fixe ("arrêt instantané") :

- . voiture - et donc ses occupants - stoppés, par exemple par un arbre
- . un corps - implicitement la personne accidentée considérée ci-dessus - en chute libre stoppé par le sol.

- Annoncée par l'expression de l'énergie cinétique, cette équivalence ne repose pas, en fait, sur la dépendance quadratique de celle-ci à la vitesse. Ce raisonnement n'utilise que cette seule hypothèse : à masse égale (implicitement) les effets du choc ne dépendent que de la vitesse incidente.

- Cette équivalence est suivie d'une autre, d'une tout autre nature, entre le poids d'un corps et la force maximum subie lors d'un choc sur un obstacle fixe, sachant - mais ce n'est pas dit - qu'un ressort s'interpose entre le corps incident et l'obstacle (liaisons internes entre organes, éventuellement ceinture de sécurité, élasticité de la tôle froissée...). Cette équivalence entre forces suppose la donnée de la vitesse incidente, mais aussi celle de la constante de rappel du ressort - ce qui est encore moins dit.

On trouve donc juxtaposés (assimilés ?) deux types d'équivalences portant l'une sur des vitesses, l'autre sur des forces, annoncées l'une et l'autre ("l'équation signifie...") par une expression énergétique, sans que rien n'articule entre elles ces diverses grandeurs.

En résumé, ce texte suggère :

- Dans son ensemble, l'amalgame habituel entre les aspects cinématiques, dynamiques et énergétiques du mouvement

(cf. pp. 44,48,153,193)

- En particulier une dépendance directe entre force ("poids apparent") et vitesse

(cf. pp. 44,158,182,193)

L'absence de pesanteur

Que Sais-je : la physiologie du Cosmonaute, par J. Colin (1965)

et Y. Houdas

II. — L'absence de pesanteur

Ce phénomène est certainement celui qui est le plus connu des non-spécialistes et, à tout le moins, le plus spectaculaire. Oserons-nous dire que c'est lui qui offre le moins de problèmes ? Pourtant, en 1951 encore, un auteur prédisait la mort en quelques minutes, par défaillance cardiaque, à l'homme qui oserait se libérer de la pesanteur. Depuis l'expérience a montré le contraire.

Avant d'aller plus loin cependant, il convient de préciser et de définir la notion d'absence de pesanteur. On a pu voir écrire « absence de gravité ». Il s'agit là d'un abus de mot, traduisant et entraînant une confusion regrettable. La gravité ou plutôt la gravitation est la force d'attraction existant entre deux masses quelconques : il ne saurait donc être question de la supprimer. Par contre la pesanteur est le résultat de la gravitation ; c'est la force exercée sur chaque corps par l'attraction gravitationnelle de la terre. On sait que, d'après la loi de Newton, cette force F_g est proportionnelle au produit des masses des deux corps en présence, soit M pour la terre et m pour un sujet, et inversement proportionnelle au carré de la distance entre ces deux masses, soit le rayon de la terre R pour ce sujet au sol.

$$F_g = G \cdot \frac{Mm}{R^2}$$

G étant la constante d'attraction universelle.

Du fait que G , R et M sont des constantes, on peut écrire :

$$F_g = mg$$

g est donc l'accélération de la pesanteur.

Certes, plus on s'éloigne de la terre, plus la distance croît et la formule ci-dessus montre que la force d'attraction diminue. En fait, si le cosmonaute y est en absence de pesanteur, c'est que le satellite est animé d'un mouvement elliptique autour de la terre tel qu'une force centrifuge est créée, égale mais de sens contraire à la force d'attraction terrestre. Et pour exprimer sur le plan biologique la notion d'apesanteur, nous utiliserons la définition qu'en ont donnée Grandpierre et Violette : « Pour qu'un objet ou un sujet placé dans un mobile se trouve en état d'apesanteur par rapport à celui-ci, il faut qu'il ne soit soumis à aucune force de la part de son support ; lorsqu'un tel état est réalisé, l'objet (ou le sujet) flotte à l'intérieur du mobile ; il est sans pesanteur par rapport à lui ! »

Cette définition permet de comprendre pourquoi il n'est pas possible de simuler l'absence de pesanteur en laboratoire, c'est-à-dire au niveau du sol, du moins pendant un temps excédant quelques secondes.

1. Moyens de simulation expérimentaux. — La *drop-tower* : c'est le dispositif le plus simple qui puisse exister : la chute libre à partir d'une tour élevée ; en fait la résistance de l'air freine très rapidement la chute et le mouvement cesse d'être uniformément accéléré ; le temps moyen en « apesanteur » n'excède guère 2 secondes. De plus, la brutale décélération à l'arrivée au sol en restreint sinon en interdit tout usage biologique.

La tour de subgravité utilisée par les chercheurs italiens (Lomonaco) s'appuie sur un principe semblable ; il s'agit d'un siège suspendu à des tendeurs élastiques ; ce siège chute d'une hauteur de l'ordre de 15 m puis les tendeurs le ramènent à une position proche de celle du départ. Il passe alors par une phase d'apesanteur avant de rechuter : on obtient ainsi une succession d'états d'apesanteur entrecoupés d'états d'hyperpesanteur, mais la durée totale de l'expérience est de quelques dizaines de secondes.

L'avion reste le meilleur moyen de réaliser expérimentalement l'état d'apesanteur. Il effectue pour cela un vol parabolique : après une prise de vitesse par un léger piqué, il suit une ligne de vol préalablement calculée (trajectoire keplérienne). On montre mathématiquement que le long de cette trajectoire, l'avion est soumis à une force centrifuge dont l'accélération est de $-1g$, donc égale et de signe contraire à la pesanteur. La durée de cette période peut, suivant les avions, atteindre 30 à 45 s ; elle est malheureusement précédée et suivie d'une accélération du type $+Gx$, mais reste très utile pour l'étude des sensations, de la locomotion, du travail en apesanteur et reste irremplaçable pour l'entraînement.

Deux autres méthodes ont été proposées qui cependant ne réalisent pas vraiment un état d'apesanteur :

L'immersion dans l'eau : le sujet est soumis, suivant le principe d'Archimède, à une force d'intensité égale mais de signe contraire à son poids. En fait, suivant la définition que nous en avons donnée plus haut, il n'y a pas vraiment apesanteur car le sujet prend appui dans l'eau elle-même ; d'ailleurs les organes internes sont toujours soumis à la pesanteur et par exemple continuent à tirer sur les pédiicules qui les soutiennent.

Les dispositifs sans frottement : il peut s'agir par exemple d'une plate-forme reposant sur un coussin d'air ; le sujet qui se trouve sur cette plate-forme ne peut créer de réactions vis-à-vis des objets qui l'entourent.

Ces méthodes ne réalisent pas d'apesanteur ; elles peuvent cependant se révéler utiles pour tenter d'étudier avec des moyens simples et économiques l'efficacité motrice d'un sujet qui n'est pas soumis à une force de la part de son environnement.

Points remarquables

Le texte distingue deux types de conditions d'apesanteur :

Définition 1 : Les situations où le "support" de l'objet n'exerce sur lui aucune force. Il s'agirait alors de la véritable "apesanteur". La retraduction formelle de cette définition est la suivante : l'accélération du mobile est g .

Définition 2 : Les situations où la résultante des forces exercées sur le corps est nulle, parce que le support de l'objet exerce une force "égale et opposée" au poids, et où, de plus, cette force ne s'exerce pas dans les conditions d'un contact habituel :

le frottement du support sur le sol est très faible (coussin d'air) ou faible (eau).

Le support non rigidement lié à une masse infinie devant celle du mobile, devient susceptible de mouvements de réaction non négligeables.

Selon l'auteur, ces situations, analogues aux précédentes par l'absence d'appuis fermes, s'en distinguent en ceci : les liaisons internes entre organes, assimilables à des ressorts sont alors "tendues", contrairement au cas de la véritable apesanteur.

Il est remarquable que l'auteur signale cette différence nette au niveau des effets, tout en donnant des deux cas le même type de modèle : Force totale nulle. C'est, bien sûr, la Force centrifuge qui équilibre le bilan dans le premier cas, avec l'avantage non explicité, de rentrer directement à l'intérieur du corps, assurant ainsi l'absence de tensions internes.

(cf. pp. 53, 170)

Inertie et Position du cavalier à cheval

La Conquête du Cheval, par Yves Benoist Gironière (1947)

La jambe. — La position est imposée d'une façon absolue par l'étrivière et le fait que le pied appuie sur la semelle de l'étrier, polygone de sustentation (fig. 4).

1° A l'arrêt une seule force agit sur la jambe : son poids, force verticale. Position d'équilibre : l'étrivière est *verticale*.

2° En action, deux forces : le poids et l'inertie, l'étrivière prend la résultante équilibre de ces 2 forces c'est-à-dire se porte *légèrement en arrière*. Si vous supprimez une partie de

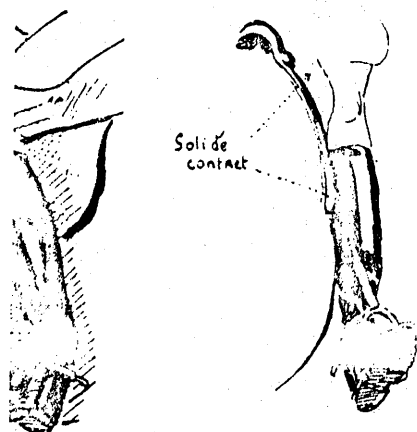


Fig. 4 — Position de la jambe.

la force verticale en serrant les genoux par exemple, vous voyez votre jambe filer vers l'arrière comme le montrent beaucoup de photos de saut d'obstacles.

A l'arrêt donc votre étrivière doit être verticale, la pointe de votre pied se trouve ainsi sensiblement à l'aplomb de votre rotule et vous ne la voyez pas.

En aucune façon le pied ne doit être en avant.

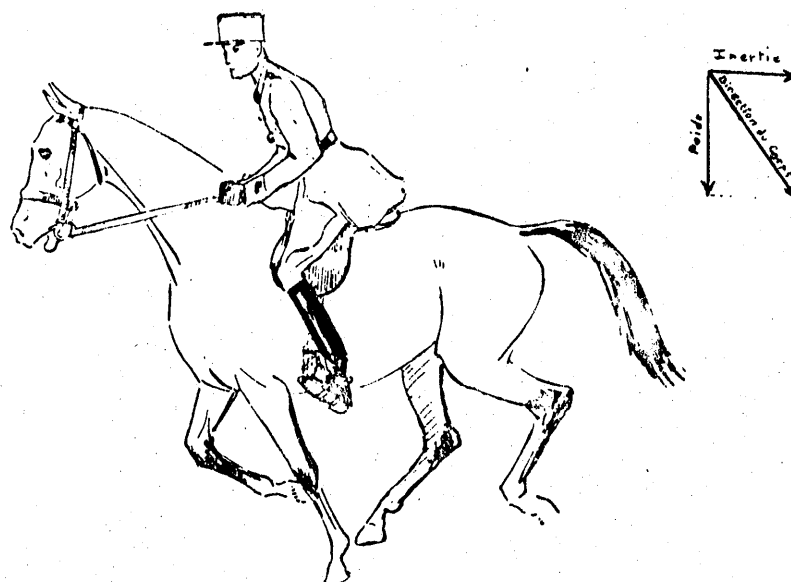


Fig. 5 — Aux allures vives, le corps prend l'inclinaison de la résultante des deux composantes : poids, force d'inertie. Si la vitesse augmente, la résultante devient de plus en plus horizontale.

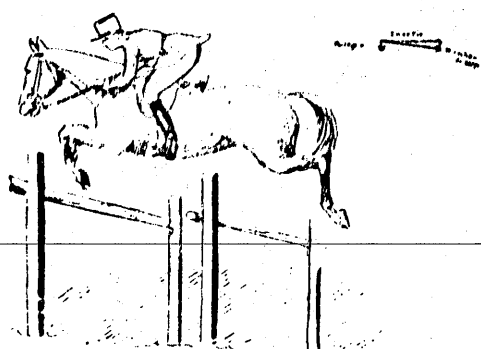


Fig. 6 — Au moment du plané, le buste est sensiblement horizontal car le poids du corps projeté en l'air n'agit plus. La force d'inertie intervient seule, la résultante est sensiblement horizontale.

Etudions la position du cavalier pendant le saut.

1^o Le cheval aborde l'obstacle : penchez le corps en avant pour ne pas être surpris.

2^o Le cheval s'enlève; cet à-coup qui rejetterait votre masse en arrière par force d'inertie est amorti par la position avancée qui l'a prévu.

3^o Le cheval plane, ne bougez plus (car c'est alors que le photographe vous prend!!!)

4^o Le cheval descend à ce moment la selle vient au contact des fesses, ne plongez pas comme font certains car vous ajouteriez votre poids à celui du cheval qui se reçoit dans une position assez peu stable sur un seul antérieur. Laissez donc votre masse traîner un peu en arrière en redressant légèrement, très légèrement le buste. Le cheval est déjà au contact du sol et un peu ralenti quand vous arrivez vous-même. Pour ne pas reprendre un contact trop brutal avec lui amortissez en fermant vos angles :

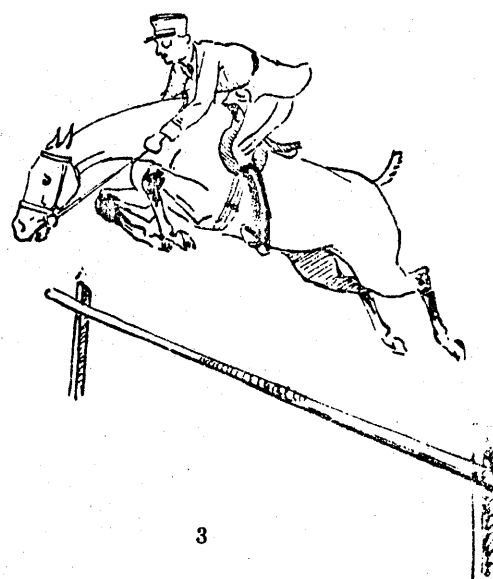


Fig. 17 — Le cavalier à l'obstacle.

3

Points remarquables

Forces d'inertie aussi "réelles" que le poids. La force d'inertie, ici, est associée tantôt à la vitesse ("aux allures vives..."), tantôt à l'accélération ("cet à-coup qui rejetterait votre masse en arrière par force d'inertie").

cf. p. 45

- Identification implicite de l'action du poids d'un objet avec l'action de cet objet sur son support (corrélativement on ne précise pas ce qui agit sur quoi) :

"Car le poids, projeté en l'air, n'agit plus"

(cf. p. 192)

"Ne plongez pas, car vous ajouteriez votre poids à celui du cheval..."

(cf. p. 192)

Pourquoi la Terre se maintient-elle sur son orbite ?

L'attraction se manifeste à la surface terrestre par la chute des corps. Si on lance une pierre, elle retombe sur le sol. Cette force d'attraction est une propriété commune à tous les corps : c'est la gravitation universelle découverte, en 1637, par Isaac Newton. La Terre et le Soleil s'attirent, de même la Lune et la Terre, etc., proportionnellement à leurs masses, en raison inverse de leur distance.

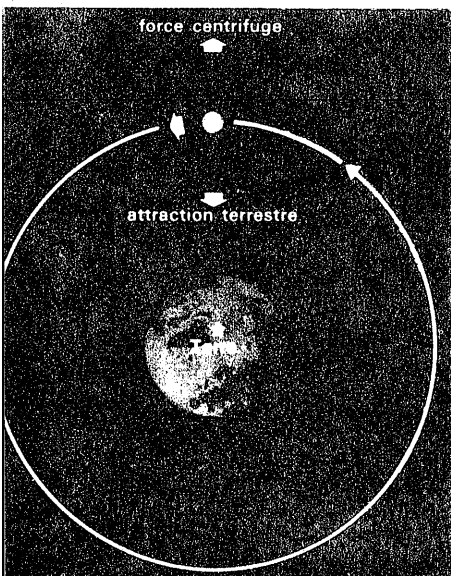
Galilée a montré que tout corps lancé dans l'espace poursuit son chemin indéfiniment, à vitesse constante, et selon une trajectoire droite.

Selon cette loi, la Terre devrait se mouvoir en ligne droite ; mais à tout instant sa trajectoire est infléchie par l'attraction du Soleil sur la Terre, analogue à celle de la Terre sur la pierre.

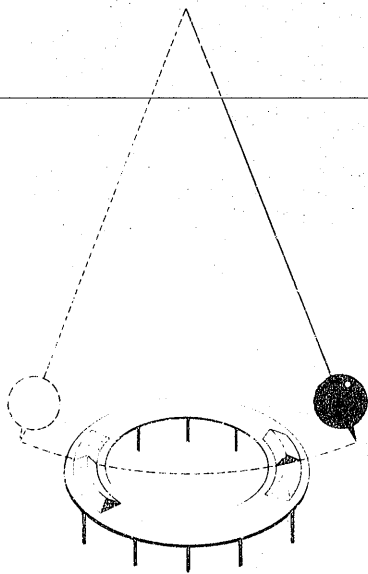
En résumé, la Terre est soumise principalement à deux forces : une force d'attraction qui tend à attirer la Terre sur le Soleil, et une force centrifuge dirigée dans la direction opposée et qui est due à la vitesse de rotation de la Terre sur son orbite. Ces deux forces se compensent exactement et à tout instant, cet équilibre maintient la Terre sur son orbite.



4. L'homme qui flotte dans l'espace forme, avec son véhicule spatial, un satellite artificiel. Il est, comme lui, en état d'apesanteur. L'un et l'autre sont soumis aux mêmes lois que la Lune, satellite naturel de la Terre, et que la Terre elle-même, satellite du Soleil.



3. Pour qu'un satellite se maintienne en orbite, il doit tourner à une vitesse telle que la force centrifuge compense exactement l'attraction de la Terre.



5. Pendule de Foucault. Si la Terre ne tournait pas sur elle-même, le stylet du pendule repasserait toujours dans le même sillon du tas de sable. Foucault constata qu'un grand pendule produisait à chaque battement un nouveau sillon à côté. Pourquoi ? Parce qu'attaché par un fil souple il garde, par inertie, la même trajectoire. Par conséquent, c'est la Terre qui tourne, alors que le pendule conserve la même direction initiale.

Points remarquables

- Force centrifuge, effet du mouvement, qui équilibre l'attraction du soleil (ou de la terre s'il s'agit d'un satellite).

Noter que ce raisonnement suit, et même "résume" un exposé parfaitement orthodoxe de la question.

- Apesanteur (voir texte sur la question, p. 208)

Le modèle de Bohr

Que Sais-je : Matière, Electricité, Energie. G. Morand (1966), p 62

Dans les débuts de la théorie de Rutherford-Bohr, on supposait que les électrons « gravitaient » autour de l'atome sur des « orbites ». Cette conception a permis le développement de la théorie quantique de l'atome qui utilise la notion de *niveaux d'énergie*. On trouve un exposé simple de cette théorie dans le livre de E. Darmon, intitulé *L'électron* et publié par les P. U. F. Nous y renverrons le lecteur, nous contentant d'exposer quelques résultats relatifs à l'hydrogène. L'électron unique de l'hydrogène est fixé par l'attraction du noyau qui est conforme à la loi de Coulomb, $F = e^2/a^2$ où a est le rayon de la trajectoire supposée circulaire. L'électron a une vitesse angulaire ω ; l'égalité de l'attraction et de la force centrifuge exige $e^2/a^2 = m\omega^2 a$ (4,8).

La vitesse linéaire sur la trajectoire est $v = \omega a$; la condition de quantification adoptée par Bohr est que « la circulation de la quantité de mouvement est égale à nh », produit d'un nombre entier par la constante de Planck; cette condition s'écrit

$$(4,9) \quad 2 \pi m \omega a^2 = nh$$

L'élimination de ω entre les relations (8) et (9)

$$\text{donne (4,10) } a = \frac{n^2 h^2}{4 \pi^2 m e^2}.$$

Point remarquable : La force centrifuge équilibre l'attraction électrostatique du noyau

(Cf. p. 53, 170)

Le Virage Aval

Que Sais-je : le Ski, J. Franco p. 35 (1967)

Le virage complet vers l'aval comprend 4 phases successives (fig. 33) :

- une préparation ou appel ;
- un déclenchement ;
- la conduite ;
- la sortie de virage ou l'arrêt.

Avant de décrire chaque phase, il est bon de fixer tout de suite les bases techniques de la phase la plus importante, le *déclenchement*. C'est la phase au cours de laquelle les skis (et le skieur) quittent la trace directe en traversée initiale pour amorcer le virage en dérapage. Pour que le virage soit déclenché, il faut :

1° Alléger les skis (fig. 34), notamment le talon des skis, pour dégager les carres de l'emprise de la neige. Cet *allègement* se fait, dans le christiania léger, par le mouvement de *flexion-extension*. La flexion des jambes n'est que le mouvement préparatoire à l'extension ; elle produit un allègement petit et non utilisé suivi d'une surcharge. En fin d'extension (comme dans un saut à pieds joints) l'allègement est maximum, d'autant plus important que l'extension a été plus violente. Si l'extension est suffisante en intensité, le poids apparent du skieur devient nul. C'est l'allègement total. Cet instant d'allègement total (de suspension) dure peu mais est suffisant pour permettre d'amorcer le virage.

Si l'extension est très vive et si le skieur replie ses jambes sous son corps, il exécute un petit saut spécial appelé *dégagement*. Les skis quittent le contact de la neige. Ils peuvent être soulevés de 10, 20 ou 30 cm ou même plus, soit par toute leur longueur (*dégagement total*) soit uniquement par les talons, les spatules restant en contact avec la neige (*dégagement partiel*). On verra l'importance du dégagement pour le déclenchement des virages dans les neiges difficiles et dans les pentes raides.

et plus loin :

De plus un autre élément, qui doit être également synchronisé, vient encore s'ajouter : c'est le *changement de carres*. Pendant la trace directe initiale, les skis sont sur leurs carres *amont*, c'est-à-dire les carres externes par rapport au virage projeté. Dès le déclenchement, le dérapage des skis ne peut se faire que sur les autres carres, c'est-à-dire les carres internes par rapport au virage. Ce changement de carres s'effectue par le jeu des chevilles et surtout par l'inclinaison du corps à l'intérieur du virage, inclinaison commandée d'ailleurs par la nécessité de lutter contre la force centrifuge.

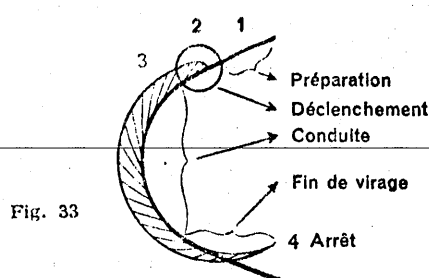


Fig. 33

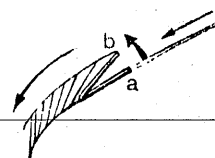


Fig. 35. — Le déclenchement est la phase active essentielle du virage

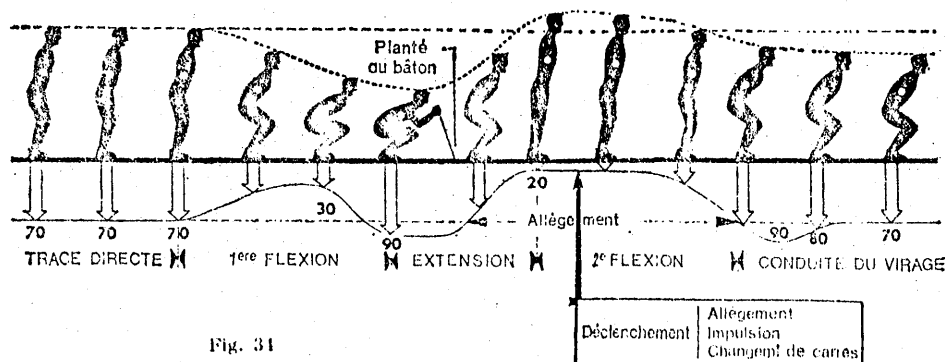


Fig. 34

Points remarquables :

- poids apparent, ici encore : c'est la force exercée par le skieur sur le sol (cf. fig. 34) et l'on retrouve la définition "stricte" de l'apesanteur du cosmonaute (p.) appelée ici "allègement total" ou "suspension" ;

- force centrifuge, contre laquelle on lutte

(cf. p. 53,170)

Adhérence lors d'un virage

Que Sais-je : la Conduite des Automobiles, p. 38 J. Rives (1968)

Dans le cas des virages à court rayon (donc parcourus à faible vitesse), l'effort moteur pouvant être appliqué aux roues motrices permet à une traction de franchir ces virages à une allure plus élevée. En effet, l'effort moteur violemment appliqué sur une roue directrice engendre une force dont la composante aura tendance à diminuer celle de la force centrifuge. Sans déraper, cette force permet de franchir certains virages plus rapidement qu'une voiture à propulsion arrière semblable par son poids et sa puissance. Il est nécessaire que l'angle de braquage des roues soit relativement important, de façon que la force de traction influe sensiblement sur la force centrifuge. C'est pourquoi cette méthode de conduite n'est « rentable » que dans les virages à faible rayon.

Elle s'avère extrêmement efficace lorsque les conditions d'adhérence sont précaires, par temps de neige ou de verglas, par exemple. Dans les épreuves routières hivernales comme le Rallye Monte-Carlo, l'avantage des « tractions » est d'ailleurs très net : des Citroën DS, des BMC-Cooper, des Saab et des Lancia y ont remporté de brillants résultats ces dernières années.

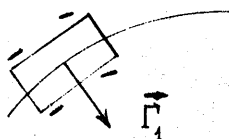
Points remarquables : composition de forces réelles et d' "inertie".

Une force de traction influe sur (se compose avec, et modifie la direction de la résultante ?) la force centrifuge.

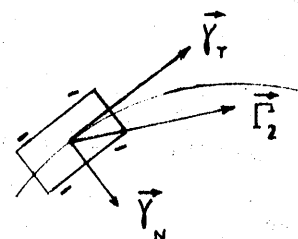
Voici les schémas figurant

l'accélération du centre de masse dans les deux cas évoqués

- vitesse de module constant (1),
ou croissant (2), de même valeur dans les deux cas à l'instant considéré:



$$|\vec{V}_1| = |\vec{V}_2|$$

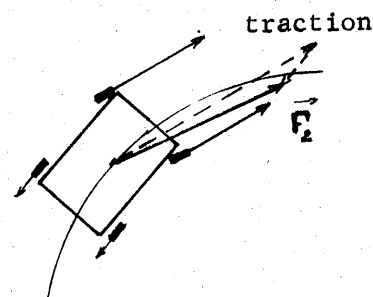


Le cas 1 suppose une adhérence latérale :

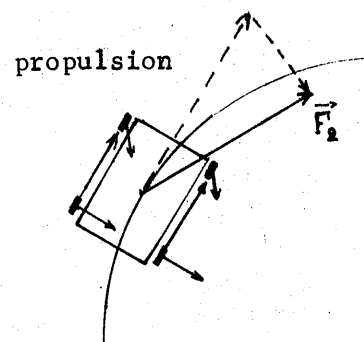
- La résultante des forces de frottement est approximativement normale aux roues.

Le cas 2 fait intervenir une résultante de forces de direction voisine de celle des roues avant. Il faut alors envisager deux cas :

- a) traction avant : Ceci se réalise avec d'autant moins de problème d'adhérence latérale que \vec{F}_1 a une direction voisine de celle des roues avant :



- b) propulsion arrière : Augmenter la force de propulsion n'infléchit en rien la résultante vers l'intérieur du virage : l'accélération radiale reste assurée par l'adhérence latérale des roues.



Plus loin dans le même ouvrage (p. 40) :

Est-il possible de neutraliser un dérapage ? Le conducteur possédant des commandes qui peuvent modifier le comportement de la voiture et les forces cinétiques qui lui sont appliquées, il apparaît à première vue probable de pouvoir au moins limiter les effets d'une vitesse excessive à l'abord d'un virage. Le but est de retrouver l'adhérence des deux essieux et de supprimer le phénomène de pivotement qui a saisi la voiture.

Les efforts tangentiels qui entraînent la voiture dans le dérapage ont une composante longitudinale T_x et une transversale T_y . En réduisant ces composantes, on réduira du même coup les efforts tangentiels et la glissade latérale : on réduit la composante longitudinale en s'abstenant de freiner ou d'accélérer ; le seul moyen de réduire la latérale est de tenter d'accroître le rayon du virage si c'est possible

... p 42

Ensuite il faut songer à supprimer le dérapage. On peut y parvenir en arrêtant tout bonnement la voiture, c'est-à-dire en supprimant toutes les forces d'inertie qui ont provoqué le dérapage. On a déjà vu que l'action de freiner les augmente. En revanche, les efforts de frottement les absorbent : la manœuvre consistera à accroître ces efforts de frottement.

Points remarquables : $F_c = \alpha(V)$

- . "forces cinétiques" appliquées à la voiture,
- . "efforts tangentiels" qui l'entraînent

- . forces d'inertie "absorbables" (capital de force) par les frottements :

$$F_{ex}(\text{frottements}) = \Delta F_c$$

Action et Réaction

Manuel de Physique

Classe de seconde C et T, H. Baissas, M. Eurin, H. Guimiot (1970) p.53

Posons un objet sur une table horizontale (fig. 7.2). Cet objet est soumis à son poids \vec{P} et cependant il ne tombe pas ! Nous sommes obligés d'admettre que la table exerce sur l'objet une force de réaction qui s'oppose au poids, donc verticale et dirigée vers le haut. En fait c'est en tous les points de la surface de contact que s'exercent ces forces d'action du poids et de réaction de la table et nous ne pouvons que dresser le bilan total de ces actions.

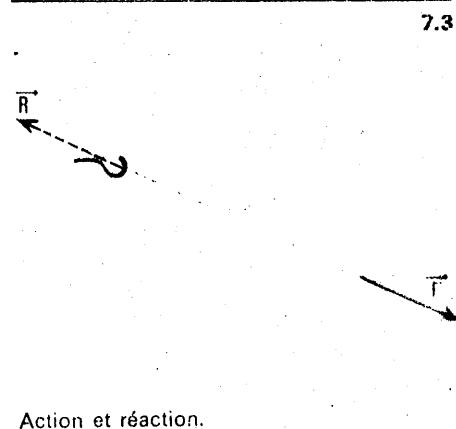
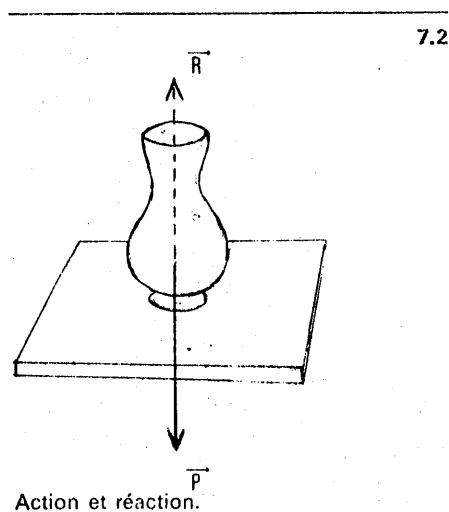
Fixons un crochet à un mur et tirons sur le crochet au moyen d'un fil solide : nous exerçons sur le crochet une force \vec{F} (fig. 7.3). Inversement le crochet exerce sur le fil une réaction \vec{R} opposée à \vec{F} .

Nous pouvons multiplier les exemples et nous arrivons à cette notion générale appelée le principe de l'action et de la réaction, énoncé par Newton :

PRINCIPE DE L'ACTION ET DE LA RÉACTION : Si un corps A exerce sur un autre corps B une force \vec{F} (action), inversement le corps B exerce sur A une force \vec{F}' (réaction) ; lorsque les deux corps sont en équilibre, il y a égalité entre l'action et la réaction.

Si nous voulons appliquer ce principe dans le cas de deux solides ayant une surface de contact, c'est en chaque point de contact qu'il faut l'appliquer.

Nous avons déjà énoncé ce principe dans le cas des forces à distance, au cours du chapitre précédent. Il est donc tout à fait général.



Point remarquable : réduction implicite de la validité du principe de l'Action et de la Réaction aux seuls cas :

- des forces à distance
- des forces de contact à l'équilibre (cf. p. 171)

Ce principe ne s'appliquerait donc pas au cheval qui tire la charette.

(cf. p. 170: déplacement de points d'application et nécessité intuitive $V \neq 0 \Rightarrow F \neq 0$)

Force active et Force passive

Deux textes à propos du travail.

J. Piaget : les explications causales, p. 96 et 99

dans un travail il intervient deux forces : celle qu'on déplace (force passive) et celle qui est utilisée pour la déplacer (force active). Comme elles sont équivalentes le physicien peut mesurer le travail au moyen de l'une (résultat obtenu) aussi bien que de l'autre (dépense nécessaire), mais psychologiquement la distinction s'impose et l'on peut soutenir que la notion de travail n'est construite qu'une fois comprise cette équivalence.

Il y a d'abord la composition d'une force et d'un déplacement (considéré en sa longueur et souvent en sa direction, donc en équivalence de complexité psychologique avec les vecteurs). Mais il y a en outre la composition entre cette relation, qui est déjà de la deuxième puissance, et la force active rendant possible le déplacement de la passive : il en résulte ainsi une liaison à la troisième puissance, d'où son caractère tardif.

Manuel de Physique, classe de seconde, J. Cessac, G. Treherne (1958)

Chapitre 9, Nathan

59. Travail moteur et travail résistant.

Dans l'exemple du manœuvre, deux forces, \vec{F} et \vec{P} (fig. 125-b), de même direction et de sens contraires, déplacent simultanément

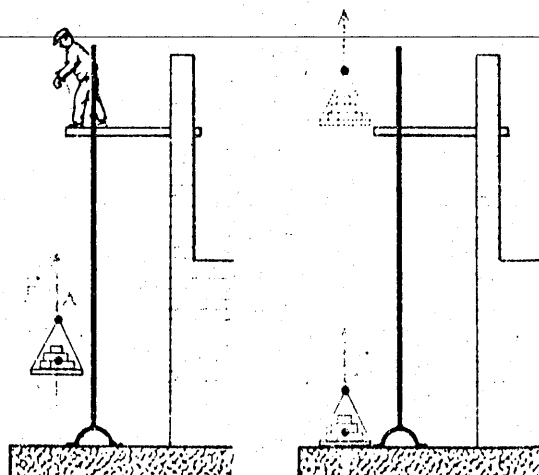


Fig. 125.

leurs points d'application sur leur droite d'action commune.

Au cours de la montée du fardeau, la force \vec{F} l'emporte sur le poids \vec{P} et le déplacement a le sens de \vec{F} ; cette force \vec{F} est alors une *force motrice* et le travail qu'elle accomplit est un **travail moteur**.

Par contre, le poids \vec{P} , de sens contraire au déplacement, tend à s'opposer à ce déplacement; c'est une *force résistante*, qui effectue un **travail résistant**.

Si le manœuvre laissait descendre le fardeau, les rôles des deux forces seraient inversés; le poids \vec{P} , alors supérieur à la force \vec{F} , serait moteur et effectuerait un travail moteur, pendant que \vec{F} , devenue force résistante, effectuerait un travail résistant.

Remarque. — Si les déplacements sont *très lents*, l'intensité de la force motrice ne surpasse que de très peu celle de la force résistante; par suite, aussi bien à la montée qu'à la descente du fardeau, **le travail moteur est pratiquement égal au travail résistant**.

J. Cessac, S. Pecot, G. Treherne (1970) classe de seconde A, chap.9, Nathan
 Texte identique jusqu'à "... travail résistant", puis :

Le cas où deux forces antagonistes effectuent simultanément un travail est fréquent. Supposons qu'une tâche soit proposée, par exemple, monter des colis au cinquième étage d'un immeuble. L'accomplissement de la tâche exige qu'une *force motrice* travaille pour déplacer le point d'application d'un poids, qui tend à s'opposer au déplacement.

La valeur W_R du *travail résistant* effectué par le poids au cours du déplacement caractérise l'ampleur de la tâche à accomplir. Le *travail moteur* W_M fourni par la force motrice représente en quelque sorte le prix qu'il faut payer pour que la tâche s'accomplisse.

Le travail moteur fourni est toujours supérieur au travail résistant obtenu ($W_M > W_R$), principalement parce que la force motrice doit vaincre, en plus du poids, diverses forces de frottement.

Point remarquable : Action, et résultante des forces, dans le sens du mouvement.

Dans ces textes, le déplacement est plus ou moins explicitement associé à ("rendu possible" par) la force qui est de même sens que lui, et de ce fait est "active".

Selon l'auteur cette force est égale à la force passive (mais alors en quoi justifie-t-elle le déplacement ?) ou légèrement supérieure. Dans ce dernier cas, la différence est liée non à l'accélération, mais au sens de déplacement. S'il s'agit uniquement (et non "principalement") de vaincre les frottements, il faudrait le spécifier, et ne pas écrire : "La force F l'emporte sur le poids P et (donc ?) le déplacement a le sens de F ". Ceci éviterait cette impression gênante qu'il s'agit simplement de justifier un déplacement par une résultante de force de même sens.

(cf. partie III, p. 92)

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail, on peut en récapituler ainsi les étapes essentielles :

- Quelques situations particulièrement simples du point de vue formel, et qui mettent en jeu des raisonnements très spécifiques (parties I et II), ont permis d'ébaucher un modèle du fonctionnement spontané de la pensée quant aux notions cinématiques et dynamiques élémentaires (cf. tab. 10, 11, 12).

Si certains de ces raisonnements coïncident avec ce que l'on enseigne, d'autres s'en éloignent notablement. Ces derniers procèdent, pour l'essentiel, d'une prise en considération globale du mouvement et de tentatives d'explications causales immédiates ; attribuée à l'objet, la cause se formule en un complexe dynamique mal différencié : force-élan-inertie-énergie potentielle ou cinétique-vitesse. Cette cause est mal localisée dans le temps et très adhérente à l'effet : la force se proportionne à la vitesse, à l'amplitude du mouvement, s'use avec l'effet, s'adapte à l'équilibre radial d'un satellite, etc... Compatible souvent, si l'on n'y regarde pas de trop près, avec des raisonnements en terme de forces fictives, ce modèle spontané n'en est que plus cohérent. On peut voir un autre facteur de stabilité dans l'attribution à l'objet même d'un complexe causal dynamique : la force exercée sur un objet, et la force de cet objet se fondent en une seule et même cause de mouvement ; de ce fait la question "qu'est-ce qui agit sur quoi ?" est souvent évacuée et les points d'applications des forces allègrement déplacés. Ceci confère une grande souplesse au système explicatif et facilite d'autant l'adaptation des causes aux effets, comme en témoigne, par exemple, l'enchaînement (implicite) souvent observé : la pierre qui tourne tire sur la ficelle → elle a une force centrifuge → elle est soumise à une force centrifuge (qui équilibre la force centripète).

- L'étude des développements historique et génétique de la pensée dans ce domaine (partie V) est l'occasion de mesurer la prodigieuse résistance de ces modes de raisonnement. Résultats, eux-mêmes, d'une certaine évolution, ces processus se stabilisent sous une forme qui s'accommode des formes ultérieures plus évoluées de la connaissance : le poids d'une bille se conserve, bien sûr, lorsqu'on a treize ans, mais il passe à l'occasion dans l'autre bille qui vient d'être heurtée. Newton établit une synthèse cohérente dans la mécanique classique, mais associe encore, à des fins explicatives, l'équilibre radial à l'égalité de l'Action et de la Réaction.

- Quelques textes relevés dans la littérature actuelle confirment la généralité du système explicatif spontané, et son rôle essentiel : s'adapter aux effets directement perçus.

Les techniques sportives notamment, sont de ces domaines privilégiés où les effets, connus par de tout autres voies, précèdent et dictent directement les explications ad hoc, les forces dans le sens des mouvements, ou nulles si aucun effet n'est perçu.

De même les "explications" du journaliste qui envisage la gravité des accidents de la route ne vont guère plus profond que la constatation enfantine "plus ça va vite, plus ça fait mal". On comprend que la pratique quotidienne des faits dynamiques, ne vienne guère remettre en cause, dans ces conditions, un système explicatif si adapté aux sensations perçues dès l'enfance.

- Que faut-il alors, pour ébranler l'édifice ?

Le fait qu'une prévision, construite sur le modèle spontané, se révèle fausse ne suffit pas à détrôner celui-ci. Le développement cognitif des enfants en témoigne : la prévision se réajuste au vu de l'expérience (sous certaines conditions de développement opératoire), l'explication s'adapte, mais selon les mêmes modalités .

Il faut, et rien n'y contraint dans la vie quotidienne, admettre la nécessité d'un formalisme restreint s'appliquant sur un ensemble

préalablement défini de situations physiques. Il faut une exigence de cohérence sur les définitions des concepts utilisés, sur les relations établies entre eux, et qui demeure parfaitement stable, indifférente à la situation examinée, pourvu que celle-ci appartienne à l'ensemble considéré. Il faut un processus d'abstraction radical.

C'est cette exigence de cohérence qui a contraint Galilée, Descartes et tant d'autres jusqu'à Newton, à dépasser l'explication ad hoc pour aboutir à la synthèse classique.

La donnée, dans le cadre scolaire, du formalisme ainsi élaboré devrait, semble-t-il, suffire à épargner aux élèves les mêmes obstinations, les mêmes impasses.

On a pu constater (partie III) qu'il n'en est rien : le système explicatif spontané s'infiltrer, à des degrés divers, dans la pratique scolaire des étudiants, en prenant des airs de formalisme. Le modèle formel, souvent, ne sert que de déguisement ou de paravent. L'incohérence formelle, quelquefois flagrante, ne remet pas toujours en cause le mécanisme spontané qui l'a engendrée. Formalisme et intuition jouent à cache-cache.

Il y a, on l'a dit, une issue possible : mieux assurer la manipulation du modèle formel, pour en faire un cadre plus radicalement contraignant. Plus qu'une possibilité, c'est même une nécessité. Mais à ne se reposer que sur cette solution, on risquerait une physique ennuyeuse et des bénéfices longs à se manifester, souvent nuls à court terme. Le modèle formel ne prend sa pleine efficacité que lorsqu'on a pu en comparer les rouages à ceux du raisonnement spontané. Cette opération se révèle, elle, d'une utilité quasi-immédiate et peut être menée à propos des notions les plus élémentaires.

De plus, on peut en observer les bénéfices sur deux plans. L'un concerne l'application immédiate des notions enseignées. Sans être en mesure d'établir un bilan triomphal, on ne peut nier les effets des tests présentés, et expliqués ensuite, aux étudiants. Certains d'entre eux, bien sûr, retomberont dans l'ornière, mais dans l'ensemble les traces de

cette opération demeurent, et d'autant plus qu'on aura pu la répéter sous diverses formes.

Mais l'essentiel se situe à un niveau plus général: il est dans une pratique active du processus d'abstraction.

L'engloutissement aveugle d'un formalisme considéré pour lui-même n'est qu'une caricature de l'abstraction, - et aboutit à déconsidérer cette notion au point qu'on n'ose plus en parler en physique : "la physique, science du concret" est-il de bon ton d'affirmer -.

Mais le concret seul ne parle guère directement : la théorie pédagogique de la "redécouverte" en a fait les frais.

Faut-il réaffirmer cette évidence : seule la confrontation permanente du formalisme et du réel construit une authentique pratique scientifique. Sans doute est-ce inutile, sous cette forme. Mais on peut ajouter que le réel engendre aussitôt une interprétation, que l'on n'a qualifiée de "spontanée" ou "d'intuitive" que pour la distinguer de modèles plus élaborés. C'est donc aussi à cette première lecture du réel qu'il faut confronter le formalisme, ce qui n'est possible que si l'on est conscient du premier terme de la comparaison. Cette prise de conscience et cette confrontation sont deux démarches personnelles et actives dont l'étudiant ne peut faire l'économie, et qui, une fois mises en oeuvre, lui font prendre réellement la mesure de ce qu'est un modèle formel. On a pu apprécier, ça et là, la satisfaction réelle qui s'ensuit.

- Il reste que l'enseignant ne peut stimuler ses étudiants dans cette voie qu'à deux conditions :

- . Avoir lui-même une connaissance sûre de la démarche spontanée déclenchée par telle ou telle situation physique.
- . Trouver les moyens d'en avertir les étudiants. Il faut, à ce titre, disposer d'outils simples, aisément transportables, et dont les produits se commentent sans faire appel à des préalables ésotériques.

L'une et l'autre de ces directions de recherche, tout juste ébauchées ici à propos d'un domaine limité, doivent être poursuivies et élargies, dans un double souci d'approfondissement des connaissances fondamentales et de maniabilité des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- . BAISSAS, H., EURIN, M., GUIMIOT, H. (1970) Manuel de Physique, classe de Seconde C et T. Hachette, Paris
- . BENOIST-GIRONIERE (1947) La Conquête du Cheval. Librairie des Champs-Élysées, Paris
- . BUNGE, M., HALBWACHS, F., KUHN, T.S., PIAGET, J., ROSENFELD, L. (1971) Les Théories de la causalité, PUF, Paris
- . BRISSON, M. (1750). Dictionnaire raisonné de toute les parties de la Physique, Tome II
- . CESSAC, J., TREHERNE, G. (1958) Manuel de Physique, Classe de seconde Sections A', C, M, M', Nathan.
- . CESSAC, J., PECOT, S., TREHERNE, G. (1970) Manuel de Physique, Classe de Seconde A, Nathan.
- . COLIN, J., HOUDAS, Y. (1965) Physiologie du Cosmonaute. Collection "Que sais-je ?" PUF, Paris
- . FEYNMAN, R.P., LEIGHTON, R.B., SANDS, M. (1965) The Feynman Lectures of Physics, Tome I. Addison-Wesley. Palo Alto
- . FRANCO, J. (1967) Le Ski. Collection "Que sais-je ?" PUF, Paris
- . HALBWACHS, F. (1977) Le problème de la découverte des possibles dans l'élaboration des lois des chocs aux XVII^e siècle. Bulletin de Psychologie, n° spécial : Hommage à Piaget. Tome XXX
- . INHELDER, B., PIAGET, J. (1955) De la logique de l'enfant à celle de l'adolescent. PUF, Paris
- . KOYRE, A. (1966) Etudes Galiléennes, Hermann, Paris
- . KOYRE, A. (1968) Etudes Newtoniennes, Gallimard, Paris
- . KUHN, T.S. (1962, reed 1970) La structure des révolution scientifiques, Flammarion, Paris
- . LEBOUTET, L. (1969) Des notions aux concepts. Une étude de psychologie génétique sur la physique élémentaire. Thèse non publiée, Paris
- . LEBOUTET, L. (1977) Concepts of mechanics among young people. Physics Education 11, 7

- . MALGRANGE, J.L., SALTIEL, E., VIENNOT, L. (1973) Vecteurs, Scalaires et grandeurs physiques. Bulletin de la Société Française de Physique Encart Pédagogique, p. 3-13
- . MALGRANGE, J.L., SALTIEL, E., VIENNOT, L. (1975) La compréhension des compositions de mouvements de translation à deux dimensions par les étudiants de premier cycle universitaire, Université Paris VII, rapport interne
- . MAURY, L., SALTIEL, E., VIENNOT, L. (1977) Etude de la notion de mouvement chez l'enfant à partir des changements de repère, à paraître in Revue Française de Pédagogie
- . MIGNE, J. (1970) Etude de représentations de notions physiques : la chute des corps. Document R3 de l'Institut National pour la Formation des Adultes, Nancy
- . MORAND, G. (1966) Matière, Electricité, Energie. Collection "Que sais-je ?" PUF, Paris
- . NEWTON, I. (1687) Principes mathématiques de la Philosophie Naturelle (1713) Traduction de Mme du Châtelet, I
- . PIAGET, J. (1972) La Transmission des mouvements, PUF, Paris
- . PIAGET, J. (1972) La direction des mobiles lors de chocs ou de poussées
- . PIAGET, J. (1972) Les notions de mouvements et de vitesse chez l'enfant. PUF, Paris
- . PIAGET, J. (1973) La formation de la notion de force, PUF, Paris
- . PIAGET, J. (1973) La composition des forces et le problème des vecteurs, PUF, Paris
- . PIAGET, J., GARCIA, R. (1971) Les explications causales, PUF, Paris
- . RIVES, J. (19) La conduite des automobiles. Collection "Que Sais-je ?" PUF, Paris
- . SALTIEL, E. (1977) Thèse en cours de rédaction, Université Paris VII
- . TONNELAT, M.A. (1971) Histoire du principe de relativité. Flammarion Paris, p. 57
- . VIENNOT, L. (1974) Sens physique et raisonnement formel en dynamique élémentaire. Bulletin de la Société de Physique, Encart Pédagogique Vol. II, p. 35-46

- . VIENNOT, L. (1975) Sens Physique... II, Forces d'inertie. Bulletin de la Société Française de Physique, Encart Pédagogique p. 59-66
- . VIENNOT, L. (1976) Mouvement et Force chez les étudiants de premier cycle universitaire. Le Pendule Simple. Bulletin de la Société Française de Physique, Encart Pédagogique, p. 77-84
- . VIENNOT, L. (1976) Intuition et Formalisme en dynamique élémentaire. Bulletin de l'Union des Physiciens, N° 587
- . VIENNOT, L. (1976) Newton et les Etudiants. La Recherche, n° 72 p.980-3

